

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



IMPACTO DE ELEVADA COBERTURA DE PAINÉIS SOLARES NO MICROCLIMA URBANO

Ricardo Miguel Baptista Ferreira

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Dissertação orientada por:

Orientador: Professor Doutor Miguel Centeno Brito

2020

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a várias pessoas, pois sem elas não seria possível ter realizado esta dissertação.

Primeiramente, ao meu orientador, o Professor Dr. Miguel Brito, que sempre demonstrou uma enorme disponibilidade para me ajudar em qualquer dúvida que tivesse, assim como a discutir opiniões e a transmitir-me todo o seu conhecimento em prol do desenvolvimento das minhas capacidades, assim como do desenvolvimento desta dissertação. Ao professor António Lopes, e à colega Márcia Matias, pela partilha de dados e ideias sobre o tema desta dissertação. À professora Sara Freitas, também por toda a ajuda e contribuição para o desenvolvimento de conhecimento sobre os temas abordados nesta dissertação.

Queria também agradecer aos meus amigos e colegas, por todo o apoio dado durante o curso, desde as intensas sessões de estudo, aos momentos de descontração, partilha de momentos de muita felicidade, e apoio nos momentos menos bons. Obrigado por me terem ajudado a tornar esta experiência única.

E por último, à minha companheira, aos meus pais, irmão, avó e restante família por todo o apoio emocional e motivacional essencial para atingir os meus objetivos ao longo desta etapa, assim como em todas as outras que se passaram. Sem o vosso apoio, tudo isto seria impossível.

Resumo

O impacto de fatores antropogénicos nos microclimas urbanos tem resultado num aumento da temperatura das cidades em relação à periferia, criando Ilhas Urbanas de Calor. Com o desenvolvimento da urbanização, este aumento será cada vez mais notável. No entanto, é possível que existam formas de se conseguir mitigar este efeito, e simultaneamente produzir energia de forma mais sustentável.

As cidades, devido ao nível elevado de edificações, apresentam um grande potencial para a instalação de painéis solares fotovoltaicos nas fachadas e telhados dos edifícios. Uma vez que os painéis fotovoltaicos convertem parte da radiação solar em eletricidade, haverá uma menor quantidade de energia no sistema edifícios-ambiente, podendo contribuir para a redução da temperatura ambiente da camada limite atmosférica urbana. Neste estudo foi avaliado o impacto de uma grande quantidade de painéis solares fotovoltaicos instalados nas fachadas e/ou telhados dos edifícios no microclima urbano, especificamente num *canyon* urbano, onde se registam maiores temperaturas em relação à periferia. Para tal, foi utilizado o software ENVI-met, um sistema de modelação de microclima holístico tridimensional com alta resolução.

Foram simulados quatro cenários com diferentes níveis de integração de painéis solares fotovoltaicos nos edifícios: sem painéis solares, com painéis apenas nos telhados, com painéis apenas nas fachadas, e com painéis nos telhados e nas fachadas. Estas simulações foram realizadas para uma rua de Lisboa, num dia típico de verão, e os valores de temperaturas estudados foram medidos a uma altura de 2 metros.

Após terem sido realizadas as simulações, os resultados indicam que o efeito dos painéis fotovoltaicos na temperatura ambiente varia de cenário para cenário, embora nenhum deles resulte numa diferença significativa. O cenário com painéis apenas nos telhados resulta num efeito nulo, ou com um aumento insignificante da temperatura durante todo o dia, enquanto que os cenários com painéis apenas nas fachadas, e com painéis nas fachadas e nos telhados apresentam uma ligeira diminuição da temperatura durante o período diurno, e um aumento no período noturno. No entanto, os valores obtidos indicam que a instalação de painéis nos edifícios não pode ser considerada uma medida de mitigação da Ilha Urbana de Calor, mas também não será um fator de aumento deste efeito.

Palavras-chave: Ilha Urbana de calor; BIPV, ENVI-met, *canyon* urbano, painéis solares fotovoltaicos.

Abstract

The impact of anthropogenic factors on the urban microclimate has resulted in an increase of temperature in the cities, when compared to the periphery. This results in the creation of Urban Heat Islands (UHIs), and with the development of urbanization, this increase will be even higher. However, there may be ways to mitigate this effect, and at the same time produce energy in a more sustainable way.

Due to the high level of building infrastructures in cities, there is a great potential for the integration of photovoltaic panels on the buildings' façades and roofs. Since photovoltaic panels convert part of the solar radiation into electricity, there will be less energy in the buildings-environment system, which can contribute to the reduction of the temperature. This study evaluates the impact of a large number of solar photovoltaic panels installed on building facades and/or roofs on the urban microclimate, more particularly in the urban canyon, where higher temperatures are registered in relation to the periphery. For this matter, it was used the ENVI-met software, which is a three-dimensional holistic microclimate modeling system with high resolution.

Four scenarios with different levels of PV integration in buildings were simulated: no PV, with PV only on the roofs, with PV only on the façades, and with PV on the roofs and façades, in a day that represented the behavior of a typical summer day in Lisbon, and the studied temperature values were measured at a height of 2 meters.

After the simulations, the results indicate that the effect of PV on temperature varies from scenario to scenario, although none of them results in a significant difference. The scenario with PV only on roofs results in a null effect, or with an insignificant increase in temperature during the day, while the scenarios with PV only on façades and with PV on facades and roofs shows a slight decrease in temperature during the day time, and an increase in the night time. However, the values obtained indicate that the installation of PV in buildings cannot be considered a mitigation measure of the UHI, but it will not be a factor of increase of this effect either.

Keywords: Urban Heat Island, BIPV, ENVI-met, urban canyon, PV.

Conteúdo

1. Motivação	1
2. Introdução	3
2.1. Ilha Urbana de calor	3
2.2. Tipos de ilhas urbanas de calor	4
2.3. Intensificadores da IUC	5
2.3.1. Calor antropogénico	5
2.3.2. Poluição do ar	5
2.3.3. Permeabilidade das superfícies	5
2.3.4. Propriedades térmicas das estruturas	6
2.3.5. Geometria das superfícies	6
2.3.6. Balanço de energia na IUC	6
2.4. Conceito de BIPV e a sua evolução	7
2.5. Impacto do BIPV na carga térmica do edifício e no microclima urbano	8
3. Metodologia	10
3.1. Escolha do local	10
3.2. Definição dos cenários	10
3.3. Escolha do software	11
3.4. Funcionamento do ENVI-MET	12
3.4.1. Fluxo de vento	13
3.4.2. Temperatura e humidade	13
3.4.3. Turbulência atmosférica	14
3.4.4. Radiação	14
3.4.5. Modelo do Solo	15
3.4.6. Modelo da vegetação	15
3.4.7. Forçamento simples no ENVI-met	16
3.5. Funcionalidades do ENVI-met	16
3.5.1. Definição de variáveis no módulo Database Manager	16
3.5.2. Módulo Spaces	17
3.5.2.1. Definição dos Solo	18
3.5.2.2. Implementação da Vegetação no modelo	19
3.5.2.3. Definição dos Recetores	19
3.5.2.4. Definição dos materiais das fachadas dos Edifícios	20
3.5.3. Módulo de visualização Leonardo	24

4. Resultados	26
4.1. Temperatura das fachadas	26
4.2. Temperatura Ambiente.....	31
5. Conclusões.....	34
6. Bibliografia	36
7. Anexos	39

Índice de Figuras

Figura 1- Efeito da Ilha Urbana de Calor (Yamamoto, 2006).....	3
Figura 2 - Tipos de Ilha Urbana de Calor (Hyoungsub Kim et al, 2018).....	4
Figura 3 - Modelos de BIPV mais comuns: A-folga de ar ventilada; B- folga de ar não-ventilada (fechada); C- diretamente sobre a superfície. (Yiping Wuang et al., 2005, Adaptada).....	7
Figura 4 - a) Evolução do preço do PV; b) Previsão do aumento da instalação de PV e de BIPV (PV Sites,2016).....	8
Figura 5-Localização da área de estudo (Rua Professor Simões Raposo) (Matias,2018).	10
Figura 6-Esquema dos submodelos existentes no ENVI-met (Sebastian Huttner,2012).	12
Figura 7- Menu de funcionalidades do ENVI-met (Headquarter).....	16
Figura 8 - Área de edição na funcionalidade Spaces.....	17
Figura 9- Representação dos tipos de solo considerados na área de estudo (preto-asfalto; cinzento claro e escuro- diferentes tipos de granito; amarelo – tijolo).	18
Figura 10 - Representação da vegetação presente na área de estudo.	19
Figura 11 - Representação dos recetores inseridos na planta.	20
Figura 12 - Material idealizado para as paredes das fachadas.....	20
Figura 13- Representação dos pontos de medição de Temperatura numa fachada (Helge Simon et al., 2017).....	21
Figura 14 - Material idealizado para a simulação de um painel fotovoltaico.....	21
Figura 15- Representação da planta estudada, criada através do Spaces.	22
Figura 16 -Introdução dos dados de temperatura e humidade relativa do primeiro dia a simular.....	23
Figura 17- Propriedades editáveis da simulação e do output.	23
Figura 18 - Resultados analisados na funcionalidade Leonardo.	24
Figura 19 - Exemplo de imagem da temperatura da planta, a duas dimensões.....	25
Figura 20 - Identificação das fachadas consideradas para a análise de dados.....	26
Figura 21 - Perfil de temperatura das fachadas no dia 7 de julho, cenário no photovoltaic panels (NPV).	27

Figura 22- Perfil de temperatura das fachadas no cenário roof with photovoltaic panels (RPV).	27
Figura 23- Variação de temperatura das fachadas no cenário roof with photovoltaic panels (RPV) em relação ao cenário no photovoltaic panels (NPV).	28
Figura 24- Perfil de temperatura das fachadas no cenário facade with photovoltaic panels (FPV).	29
Figura 25- Variação de temperatura das fachadas no cenário facade with photovoltaic panels (FPV) em relação ao cenário no photovoltaic panels (NPV).	30
Figura 26- Perfil de temperatura das fachadas no cenário com PV nas fachadas e nos telhados (BIPV).	30
Figura 27-Variação de temperatura das fachadas no cenário com PV nos telhados e nas fachadas (BIPV) em relação ao cenário no photovoltaic panels (NPV).	31
Figura 28 - Variação da temperatura ambiente entre o cenário no photovoltaic panels (NPV) e roof with photovoltaic panels (RPV).	32
Figura 29 - Variação da temperatura ambiente entre o cenário no photovoltaic panels (NPV) e facade photovoltaic panels (FPV).	33
Figura 30- Variação da temperatura ambiente entre o cenário no photovoltaic panels (NPV) e PV nos telhados e nas fachadas (BIPV).	33
Figura 31 - Planta referente ao Cenário RPV (Implementação de PV apenas nos telhados).	40
Figura 32 - Planta referente ao Cenário FPV (Implementação de PV apenas nas fachadas).	40
Figura 33 - Planta referente ao Cenário BIPV (Implementação de PV nos telhados e nas fachadas)... ..	40
Figura 34- Aumento máximo da temperatura das fachadas no cenário RPV em relação ao cenário NPV (18:00h).	41
Figura 35- Diminuição máxima da temperatura no cenário RPV em relação ao cenário NPV (06:00h).	41
Figura 36- Aumento máximo da temperatura das fachadas no cenário FPV em relação ao cenário NPV (20:00h).	42
Figura 37- Diminuição máxima da temperatura das fachadas no cenário FPV em relação ao cenário NPV (12:00h).	42
Figura 38-Aumento máximo da temperatura das fachadas no cenário BIPV em relação ao cenário NPV (20:00h).	43
Figura 39- Diminuição máxima da temperatura das fachadas no cenário BIPV em relação ao cenário NPV (12:00h).	43

Índice de Tabelas

Tabela 1- Características físicas dos materiais utilizados para a construção da parede (ITE 50).	16
Tabela 2- Características físicas dos materiais constituintes dos painéis fotovoltaicos.	16
Tabela 3-- Dados da temperatura e humidade relativa referentes ao primeiro dia a simular	39

1. Motivação

O aumento da população mundial é uma realidade cada vez mais acentuada no nosso quotidiano. Enquanto que em 2010 existiam cerca de 7 mil milhões de habitantes, atualmente estima-se que existam aproximadamente 7.7 mil milhões, e é esperado que em 2040 ultrapassemos os 9.1 mil milhões (United Nations, 2019). Este aumento, em conjunto com o êxodo rural, leva a um aumento da população a habitar o meio urbano. Atualmente, 55% da população mundial reside em áreas urbanas, sendo que em Portugal este valor atinge os 65% (United Nations, 2018). Com este crescimento populacional, assim como o das áreas urbanas, o consumo de energia também irá aumentar. Prevê-se que em 2040 o consumo de energia mundial seja aproximadamente 231 000 TWh/ano, o que corresponde a um aumento de 27%, face aos valores do consumo de energia em 2018 (EIA, 2019).

A principal fonte de energia utilizada para corresponder à crescente necessidade tem sido os combustíveis fósseis. Em 2018, aproximadamente 80% da energia consumida a nível mundial proveio desta fonte bastante poluente (EIA, 2019). No entanto, devido aos impactos negativos que os combustíveis fósseis apresentam, são cada vez mais utilizadas fontes de energia renováveis. De facto, estima-se que as fontes de energia renováveis venham a produzir cerca de 30% da energia primária consumida em 2040. Entre 2018 e 2040, este valor representa um aumento médio anual de cerca de 2,3% de produção de energia renovável (EIA, 2019).

De forma a mitigar o impacto do aumento das zonas urbanas, e em simultâneo aproveitar a sua área disponível, cada vez mais se procura integrar a produção de energia renovável no meio urbano. Neste sentido, a energia solar fotovoltaica tem sido a que apresenta uma maior evolução, de forma a aproveitar as energias renováveis sem causar efeitos negativos à envolvente do local de instalação (efeitos esses existentes na produção de energia eólica ou hídrica, por exemplo). De facto, em 2014, a potência mundial instalada de painéis fotovoltaicos era aproximadamente 180GWp, enquanto que em 2016 subiu para 320GWp (Jäger-Waldau, A., 2017), o que reflete um aumento de aproximadamente 78%, no espaço de dois anos, e prevê-se que este aumento continue nos próximos anos.

No entanto, é importante que sejam considerados os possíveis impactos negativos desta exploração energética. Um dos pontos que necessita de ser analisado é o impacto dos painéis fotovoltaicos no clima urbano. Com o aumento da urbanização, o balanço radiativo das cidades tem sido afetado. O efeito da poluição antropogénica já é notável o suficiente, pelo que é preciso estudar o impacto de uma maior instalação de painéis fotovoltaicos no balanço radiativo, assim como a sua influência no conforto térmico e saúde dos habitantes e do ambiente.

Assim, esta dissertação tem como principal objetivo o estudo do impacto dos painéis fotovoltaicos num microclima urbano. Para tal, é necessário estudar primeiramente as diferentes componentes do microclima urbano, os fatores que o afetam, e os efeitos presentes no mesmo. É também necessário considerar diferentes níveis de integração de painéis fotovoltaicos, de forma a compreender o impacto das diferentes formas de instalação (instalação nas fachadas, nos telhados ou em ambos) no microclima urbano, visto que é espetável que cada tipo de instalação tenha diferentes impactos.

Esta dissertação apresenta na sua composição, e como revisão dos temas abordados, um estudo do conceito da Ilha Urbana de Calor, e da sua composição, bem como os intensificadores deste efeito; um estudo do conceito de *Building Integrated Photovoltaic*, da sua evolução, dos diferentes tipos, e uma revisão bibliográfica sobre o seu impacto na carga térmica dos edifícios.

Após a revisão dos conceitos relevantes para a compreensão deste tema, segue-se a metodologia para a obtenção de resultados, ou seja, a escolha do software a utilizar (ENVI-met), assim como um

resumo do seu funcionamento e funcionalidades, a escolha do local, bem como os critérios considerados, e os materiais considerados para as simulações.

Por último, são apresentados, e posteriormente discutidos, os resultados das simulações dos diferentes cenários definidos, tanto na temperatura ambiente como na temperatura das fachadas, para que seja possível concluir o impacto dos diferentes cenários no microclima urbano e na Ilha Urbana de Calor. Ainda, é feita uma estimativa do efeito dos painéis fotovoltaicos nos edifícios, com base nas medições da temperatura das fachadas.

2. Introdução

2.1. Ilha Urbana de calor

Entre todas as modificações climáticas resultantes do espaço urbano, é importante destacar o aumento de temperatura, a possibilidade de ocorrência de circulações de fluxos indesejáveis (e até perigosos por vezes), as alterações na velocidade do vento, e até o aumento de precipitação em casos específicos (Alcoforado et al., 2009). Então, pode-se definir o clima urbano como uma resultante das alterações que o espaço urbano provoca nas condições climáticas da cidade.

De acordo com Lopes (2016), a disposição das cidades está feita de forma a existir um equilíbrio térmico, fazendo com que haja áreas mais aquecidas e áreas mais arrefecidas. Esta diferença de temperatura entre as várias zonas das cidades está diretamente relacionada com uma maior, ou menor, densidade de prédios, tráfego, e espaços verdes. Quando esta diferença é positiva, ou seja, há um aumento da temperatura no espaço urbano em relação à envolvente rural, existe o fenómeno a que se dá o nome de Ilha Urbana de calor (Lopes, 2003). Este fenómeno, ilustrado na Figura 1, é causado por atividades antrópicas e modificações do balanço energético do espaço urbano. Quando é intensificado, pode ainda alterar o consumo de energia, tanto no verão como no inverno. A intensidade da IUC é quantificada de acordo com a variação entre a temperatura registada no local mais quente da cidade e a temperatura mais baixa registada entre os diversos locais envolventes (Matias, 2018). Este fenómeno existe durante todo o ano, no entanto varia sazonalmente, sendo notável uma maior variação no verão e inverno em relação ao outono ou primavera. No inverno regista-se maiores diferença de temperatura em relação à periferia comparativamente ao verão.

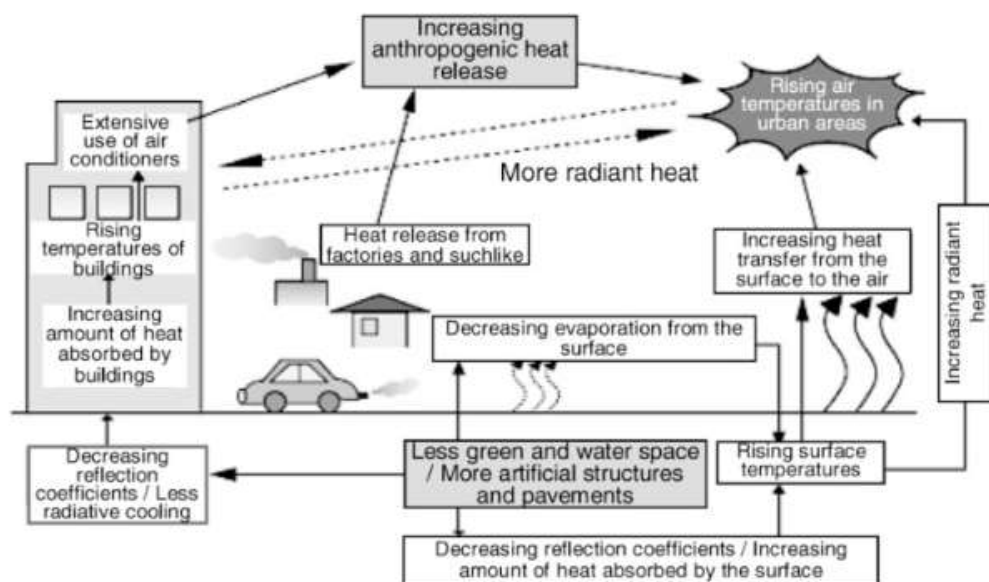


Figura 1- Efeito da Ilha Urbana de Calor (Yamamoto, 2006).

2.2. Tipos de ilhas urbanas de calor

T.R. Oke (2017) definiu 3 diferentes tipos de Ilha Urbana de Calor, de acordo com a altitude a que são formadas, diferentes géneses, magnitudes e dinâmicas temporais. Desta forma, foi possível definir a IUC com uma maior especificação do que a definição usualmente utilizada de que esta corresponde à diferença de temperatura entre a área urbana e as áreas vizinhas:

- Ilha de calor da *Urban Canopy Layer* (ou da Atmosfera Urbana Inferior);
- Ilha de calor da *Urban Boundary Layer* (ou da Atmosfera Urbana Superior);
- Ilha de calor de superfície;

Na Figura 2 está representada a separação dos diferentes tipos de Ilha de Calor Urbano.

A IUC de superfície refere-se à absorção da radiação solar pelas superfícies que estão a uma temperatura superior à região envolvente (e.g. fachadas, telhados e pavimento). Segundo Voogt e Oke (2003), a temperatura destas superfícies podem chegar a temperaturas entre 27 e 50°C acima da temperatura do ar num dia de verão. Referem ainda que a temperatura da superfície tem uma influência direta e significativa na temperatura atmosférica, principalmente na atmosfera urbana inferior, devido à condutividade térmica.

A IUC da atmosfera urbana inferior ocorre entre o nível do solo e o topo dos edifícios, enquanto que a IUC da atmosfera urbana superior se refere à camada atmosférica acima do topo dos edifícios e até ao topo da camada limite urbana (Velazquez-Lozada et al., 2006). A intensidade da IUC da atmosfera inferior é mais baixa durante o dia, enquanto que quando o Sol se põe a sua intensidade aumenta, devido ao calor que as superfícies absorvem durante o dia e libertam no período noturno.

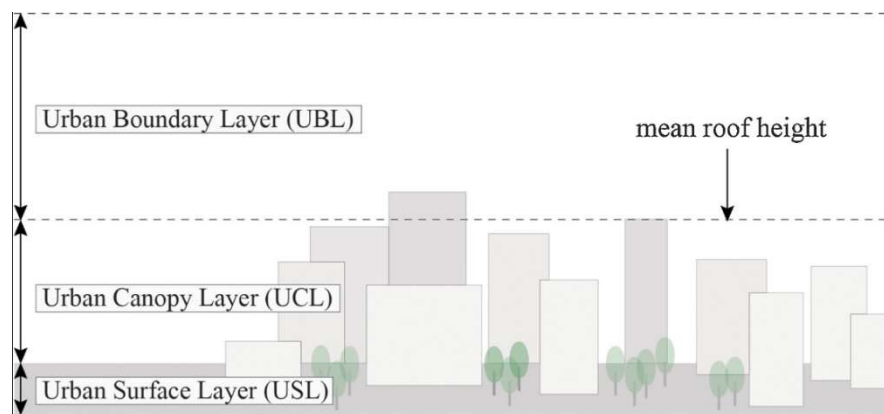


Figura 2 - Tipos de Ilha Urbana de Calor (Hyoungsub Kim et al, 2018).

2.3. Intensificadores da IUC

Como já foi referido anteriormente, a IUC é intensificada maioritariamente por atividades antropogénicas, e também por fatores naturais como o vento (embora o seu perfil possa ser alterado pela edificação das cidades) ou as nuvens.

A constante evolução das cidades leva a um maior número de construções prediais e estradas, de forma a facilitar os acessos locais, e consequentemente a um aumento da circulação automóvel (circulação essa que também é um fator de aumento da IUC). Para tal, as grandes áreas espaçosas e a quantidade de espaços verdes são convertidas em grandes estruturas edificadas e industriais. Todos estes fatores contribuem para um aumento do efeito de IUC.

As principais causas da intensificação da IUC dividem-se em 5 categorias: o calor antropogénico, a poluição do ar, a permeabilidade das superfícies, as propriedades térmicas das estruturas e a geometria das superfícies (Shahmohamadi et al, 2011).

2.3.1. Calor antropogénico

A atmosfera urbana é aquecida através dos processos de convecção, condução e radiação pelas fontes de calor antropogénico. Estas fontes incluem o aquecimento e arrefecimento nos edifícios, os transportes, a iluminação, a manufatura em fábricas, assim como o calor libertado pelos metabolismos humanos (J. T. Peterson, 1969). No entanto, o calor antropogénico pode ter um maior impacto na IUC dependendo da latitude e época do ano. Numa cidade de clima temperado, como no caso de Lisboa, o calor antropogénico afeta bastante o balanço energético no inverno, no entanto não é tão notável no verão, embora essa diferença entre as estações tenha vindo a diminuir ao longo dos anos.

2.3.2. Poluição do ar

A poluição atmosférica do ar é proveniente principalmente das emissões da atividade industrial, doméstica e automóvel. Esta poluição afeta a IUC, pois funciona como uma barreira entre a interação terra-atmosfera, ou seja, da radiação infravermelha que a terra emite para a atmosfera, apenas uma parte se perde para o espaço, sendo que a maioria é absorvida pelos gases de efeito de estufa. Esta radiação absorvida vai ser novamente emitida para a terra, resultando assim num aumento da temperatura do ar. Por outras palavras, a poluição do ar tem uma contribuição positiva no efeito de estufa, fazendo assim com que quanto maior seja a quantidade de gases poluentes libertados, maior será o aumento da temperatura do ar logo mais afetará a IUC.

Ainda, os poluentes contribuem para a criação de uma camada de inversão, que impede o ar de arrefecer ao ritmo normal, e reduz a dispersão dos gases poluentes da zona urbana (D. O. Lee, 1984), levando a um aumento da concentração dos gases, e a um agravamento dos impactos acima referidos.

2.3.3. Permeabilidade das superfícies

Os edifícios, assim como o pavimento nas ruas, são construídos habitualmente de forma a ter uma superfície impermeável, e com pontos por onde a água precipitada é escorrida, criando um défice de evaporação na cidade. Ainda, para construir um maior número de edifícios, a vegetação é reduzida nas cidades até um mínimo, de forma a obter mais espaço para o desenvolvimento urbano. Desta forma, enquanto que no meio rural a água retida pelo solo e pela vegetação serve para arrefecer o ar por

processos convectivos por evapotranspiração, na cidade estes mesmos processos não ocorrem por falta de água, contribuindo assim para um maior efeito de IUC.

2.3.4. Propriedades térmicas das estruturas

Tal como em relação à permeabilidade das superfícies, os espaços naturais têm um maior calor específico inferior, assim como uma menor inércia térmica, pelo que absorvem menos radiação solar do que os materiais utilizados na construção de uma cidade, como o asfalto ou o betão. Ainda, o albedo urbano é em média 5 a 10% inferior ao valor nas zonas rurais (D. O. Lee, 1984), o que contribui para uma maior absorção da radiação de onda curta durante o dia, levando a um maior efeito de IUC.

2.3.5. Geometria das superfícies

A média anual da velocidade do vento nas cidades é aproximadamente 30 a 40% mais baixa em comparação com o meio rural (D. O. Lee, 1984; Lopes 2011 em Lisboa), pelo que o ar quente, aquecido pelas atividades antropogénicas, não circula devidamente, e, portanto, não arrefece. Este efeito na circulação horizontal do ar na cidade deve-se à geometria urbana, uma vez que é bastante mais complexa e com inúmeros obstáculos (construções) que afetam a circulação do ar.

A geometria da superfície urbana afeta ainda o balanço radiativo da cidade. As paredes dos prédios, entre outras componentes, refletem e absorvem a radiação térmica durante o dia; e durante a noite o arrefecimento natural demora mais a ocorrer devido ao baixo fator ocultação do céu (*sky view factor*), que é inferior também devido às construções urbanas.

Devido à elevada urbanização, que leva a um maior aproveitamento do espaço, ou seja, a um estreitamento das ruas das cidades, e à construção de edifícios mais altos, criam-se microclimas com condições climáticas específicas dentro das próprias cidades. Estes microclimas vão ter um impacto no aquecimento e arrefecimento dos edifícios, e podem ainda ter um impacto na luminosidade dos mesmos, e da rua. A estas geometrias longas, estreitas e com edifícios altos à sua volta, onde se criam estes microclimas, dá-se o nome de *canyon* urbano (Oke, 1978;2017).

2.3.6. Balanço de energia na IUC

Tendo em conta as propriedades da IUC identificadas anteriormente, T.R. Oke (1980) definiu uma equação para estimar o balanço de energia no local onde ocorre o fenómeno, como representado na Eq. [2.1]:

$$Q^*+QF=QH+QE+\Delta QS+\Delta QA \quad [2.1]$$

sendo Q^* o balanço radiativo; QF o calor antropogénico; QH e QE os fluxos de calor sensível e latente, respetivamente; ΔQS o calor sensível armazenado nos solos e nas superfícies, e ΔQA o fluxo de advecção horizontal.

2.4. Conceito de BIPV e a sua evolução

O conceito de *Building integrated photovoltaic* (ou edifícios com painéis fotovoltaicos integrados) não é recente (data à década de 70), no entanto o seu desenvolvimento foi lento devido principalmente ao preço dos painéis solares e à dificuldade de instalação e integração nos edifícios. Este conceito consiste, como o nome indica, na integração de painéis fotovoltaicos no edifício, quer seja na fachada, no telhado, ou em ambos. A sua montagem pode ser feita de várias formas: diretamente sobre a fachada/telhado, com uma folga de ar, ventilada ou fechada, entre o PV e a superfície, entre outras. A Figura 3 ilustra estes três tipos de montagem mais comuns:

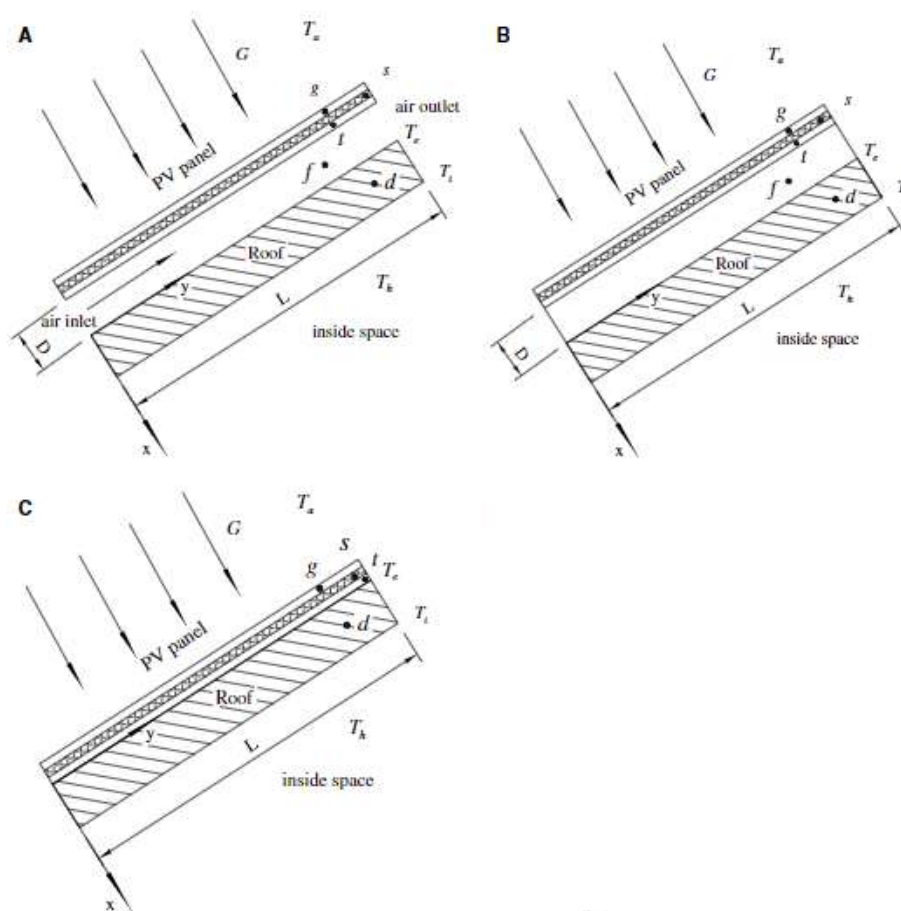


Figura 3 - Modelos de BIPV mais comuns: A-folga de ar ventilada; B- folga de ar não-ventilada (fechada); C- diretamente sobre a superfície. (Yiping Wang et al., 2005, Adaptada).

O objetivo principal destes sistemas é a produção de energia através de uma fonte renovável, de forma descentralizada, quer seja para autoconsumo no edifício ou para fornecimento à rede. No entanto, também contribui para um aumento da conservação do estado do edifício, ao captar a radiação solar que incidiria nas paredes e telhados, desgastando-os, ao sombrear estas superfícies, e pode inclusive contribuir para uma diminuição da poluição sonora, ao aumentar a camada de materiais constituintes das fachadas, e aumentando o efeito de barreira do som entre o exterior e o interior dos edifícios (e vice-versa).

O número de sistemas BIPV tem crescido a nível mundial, acompanhando o acentuado decréscimo do preço dos painéis fotovoltaicos, como se pode verificar na Figura 4.a e b, tendo evoluído de 2 para 4% desde 2014. Embora estes valores sejam baixos, a previsão é que o aumento da existência de BIPV's seja exponencial, prevendo-se que em 2021, 13% da potência instalada de PV a nível mundial seja proveniente de BIPV's (PV Sites,2016).

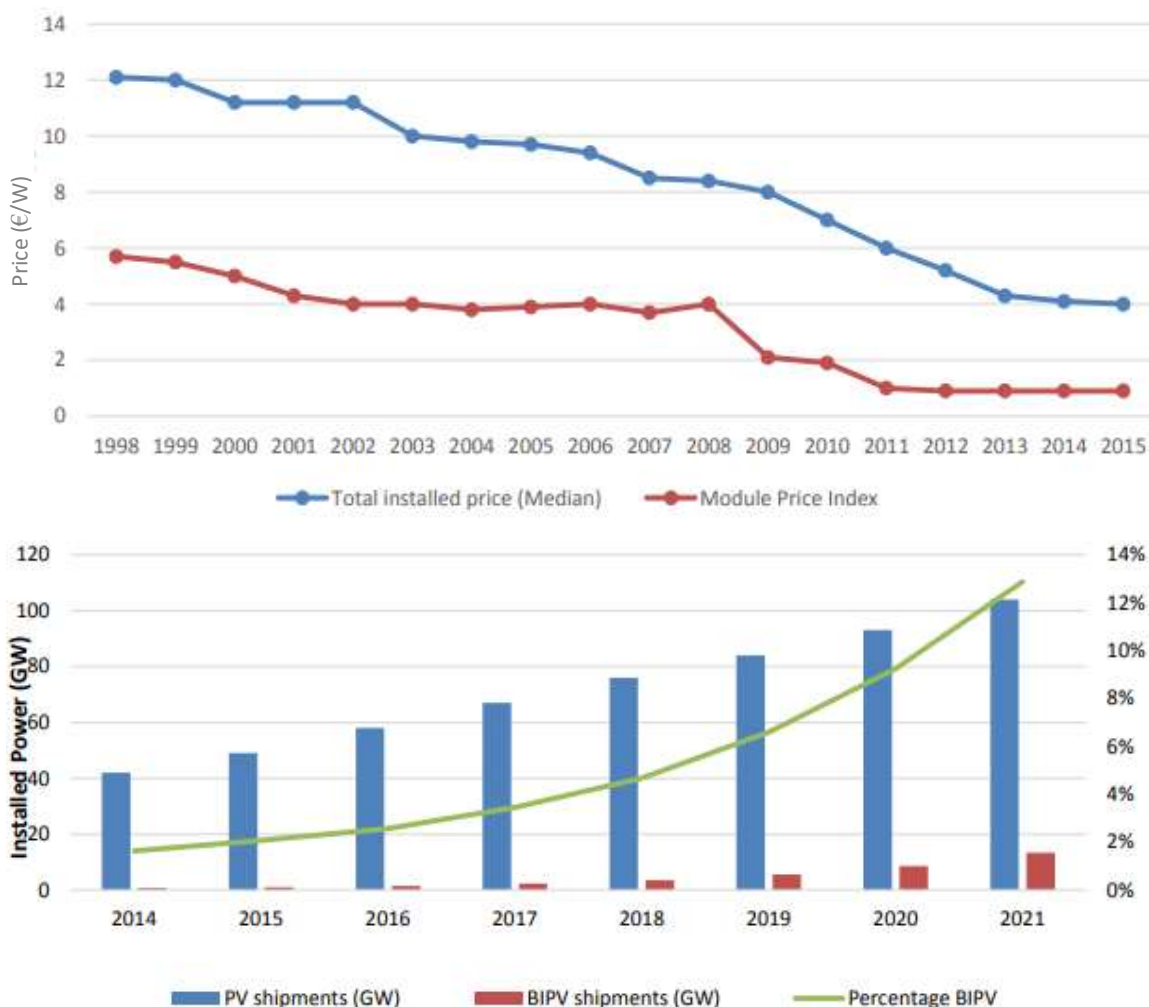


Figura 4 - a) Evolução do preço do PV; b) Previsão do aumento da instalação de PV e de BIPV (PV Sites,2016).

2.5.Impacto do BIPV na carga térmica do edifício e no microclima urbano

O aumento substancial do número de edifícios com BIPV deve-se também a uma consolidação de conhecimento sobre o efeito destes no próprio edifício. Foi necessário avaliar tanto a sua capacidade de produção de energia, como também o impacto que teria na carga de aquecimento e arrefecimento dos espaços no interior do edifício, para que fosse perceptível se de facto seria rentável o seu desenvolvimento. Neste sentido, foram realizados vários estudos sobre o impacto do BIPV na carga de aquecimento e arrefecimento dos edifícios, assim como a sua capacidade de produção de energia.

Yiping Wuang et al.(2005) concluíram, numa análise de três tipos diferentes de montagem de BIPV no telhado de um edifício em Tianjin (China), que embora a necessidade de aquecimento e arrefecimento

varie de acordo com cada montagem, a construção com um telhado convencional irá sempre ter uma maior necessidade de aquecimento no inverno, e no verão uma menor necessidade de arrefecimento até aproximadamente à hora do pico solar local, à exceção de uma das montagens, que reduz significativamente a carga de arrefecimento durante todo o dia (montagem com uma folga de ar ventilada). Athienitis et al.(2018) desenvolveram um modelo matemático e, através da ferramenta de simulação Detect2.3, estudaram o impacto de BIPV nas necessidades elétricas dos edifícios em climatização. Ao realizarem este estudo para sete cidades diferentes na Europa, concluíram que a energia gasta em climatização é reduzida entre 1 e 16%, dependendo do clima local e do efeito térmico passivo e ativo do BIPV.

Ordenes et al. (2006) avaliaram a produção de energia de um sistema de BIPV em três cidades diferentes no Brasil (Natal, Brasília e Florianópolis) utilizando a ferramenta EnergyPlus. Para o estudo consideraram 7 tipos diferentes de PV para avaliar qual o que produz mais energia nos cenários definidos. Em qualquer um dos cenários, a energia produzida pelo PV permite um balanço de energia nulo anual. Ainda, alguns dos cenários fornecem energia à rede pública por excesso de produção do PV durante cerca de 30% do tempo em que estes estão a produzi-la.

No entanto, existe uma escassez de estudos através da utilização de programas de simulação sobre o impacto do BIPV nos microclimas urbanos. Considerando a Equação [1], é necessário compreender qual o possível impacto da integração de PV nos microclimas, uma vez que irá afetar grande parte dos fatores que são considerados na mesma.

Yutaka et al. (2003) estudaram o impacto da instalação de PV em larga escala na cidade de Tóquio em áreas com três tipos diferentes de edifícios (edifícios de escritórios, residenciais de betão e residenciais de madeira) através de um modelo que desenvolveram para o efeito. Através das suas simulações concluíram que o efeito que a instalação de PV tem na temperatura ambiente é negligenciável. Wei Tian et al. (2007) definiram quatro modelos matemáticos de balanço energético de forma a estudar o impacto do BIPV num *canyon* urbano em Tianjin (China), tendo concluído que a temperatura das fachadas e telhados iria diminuir significativamente com a implementação de PV, no entanto a temperatura ambiente não iria sofrer alterações significativas. Concluíram ainda que os fluxos de calor sensível no *canyon* urbano são reduzidos com a implementação de PV. A razão pela qual a temperatura das superfícies onde se implementa PV diminui deve-se à radiação que as células fotovoltaicas convertem em energia elétrica e à condução de ar entre a parede e o PV instalado. Desta forma, a superfície (parede ou telhado) não está sujeita à incidência de radiação solar direta, servindo o PV como um sombreamento para as superfícies dos edifícios.

Tendo em conta os conceitos abordados neste capítulo, segue-se a metodologia, onde são definidos os diferentes parâmetros deste estudo, para que se possa simular da melhor forma o impacto do BIPV na IUC, e se pode ser considerado uma medida de mitigação deste efeito.

3. Metodologia

3.1. Escolha do local

Para a realização deste estudo, procurou-se escolher um local do concelho de Lisboa. Por esse motivo, e de forma a aproveitar as medições de temperatura ambiente já existentes, optou-se pela Rua Professor Simões Raposo, em Telheiras, na freguesia do Lumiar (representada na Figura 5), recolhendo assim os dados medidos por Matias (2019).

Segundo Matias, a escolha da área de estudo baseou-se em dois critérios:

- A área de estudo deveria ser ampla e sem obstáculos, dado que um dos objetivos seria obter imagens térmicas;
- A área escolhida devia representar o típico *canyon* urbano, e ao mesmo tempo representar o tipo de construção atual.

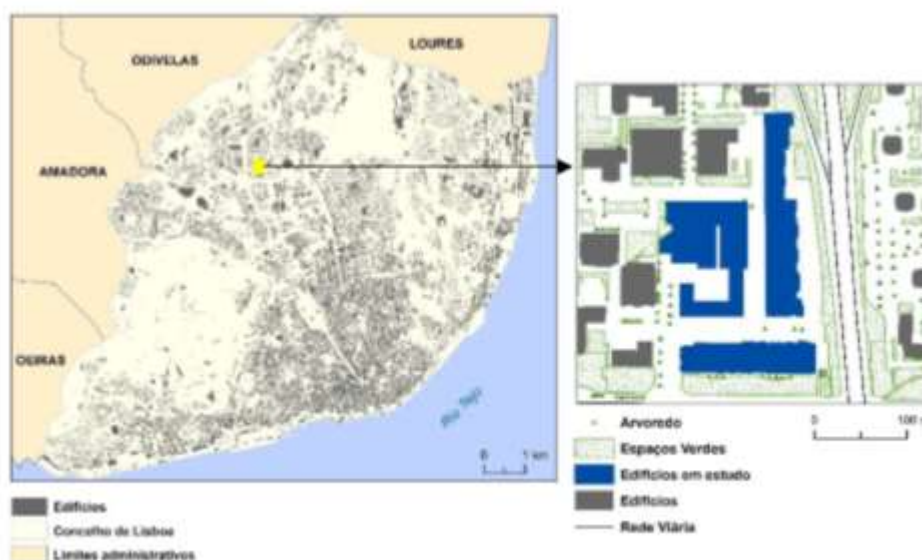


Figura 5-Localização da área de estudo (Rua Professor Simões Raposo) (Matias,2018).

Os dados de temperatura e humidade relativa foram obtidos de uma rede micro-meteorológica composta por 6 termo-higrógrafos Hobos Pro V2, instalada pelo Grupo de Investigação Zephyrus – Alterações Climáticas e Sistemas Ambientais, do Centro de Estudos Geográficos/IGOT-Ulisboa, que esteve instalada entre 20 de Abril e 27 de Julho de 2018 (Matias, 2018).

Os edifícios da zona escolhida, assinalados a azul na Figura 5, apresentam uma altura entre os 24 e os 33m.

3.2. Definição dos cenários

De forma a obter a maior quantidade de informação possível, foram considerados vários cenários de simulação. O primeiro fator a decidir foi a data da simulação. Considerando que, como já foi referido, as estações com um maior efeito de IUC são o verão e o inverno, e que a radiação solar em Portugal é bastante superior durante o verão, foi escolhido um dia considerado típico de verão em Lisboa, ou seja, seco e com uma temperatura média de 23°C (IPMA,2018). Considerando estas especificações, foram

realizadas simulações para o dia 7 de julho. Os dados de temperatura e humidade relativa para este dia encontram-se no Anexo 1.

Escolhida a localização e os cenários climáticos para as simulações, foram escolhidos também os diferentes cenários a simular. Para tal, foram considerados quatro níveis de penetração de painéis fotovoltaicos, de forma a compreender o impacto dos diferentes locais de instalação dos painéis nos edifícios:

- Sem integração de painéis fotovoltaicos;
- Com integração de painéis fotovoltaicos no telhado;
- Com integração de painéis fotovoltaicos nas fachadas;
- Com integração de painéis fotovoltaicos nas fachadas e nos telhados.

Para qualquer um dos casos com PV (painéis fotovoltaicos) nas fachadas, foram simulados painéis desde os 0m até ao topo dos edifícios, e em todas as fachadas (com orientação a Sul, Este, Oeste e Norte). Esta abordagem foi realizada de forma a estudar o impacto máximo da instalação de PV na temperatura ambiente.

3.3. Escolha do software

Como já foi referido, neste estudo foi utilizada o software ENVI-met - um sistema de modelação de microclima holístico tridimensional com alta resolução- para simular um *canyon* urbano típico em Lisboa. O ENVI-met permite o estudo da temperatura ambiente, bem como a temperatura das fachadas e das diferentes camadas que a constituem, a radiação incidente e refletida, entre outras componentes microclimáticas. Embora existam vários softwares para simulação climática urbana, o ENVI-met permite uma simulação mais precisa, tanto por ser um sistema tridimensional (ao contrário do software UMEP, por exemplo), como também por permitir ao utilizador estudar as temperaturas das fachadas e os fluxos de radiação, fornecendo mais informações de importância para o caso de estudo quando comparado com os diferentes softwares de simulação de microclimas urbanos (como o ADMS ou o modelo MUKMILO_3). Ainda, o ENVI-met tem uma melhor resolução temporal (<10s) e espacial (entre os 0.5m e os 10m). O ENVI-met consegue ainda simular as interações entre os edifícios, a atmosfera, o solo e a vegetação.

O ENVI-met é bastante utilizado em estudos, para realizar simulações de possíveis medidas de mitigação do calor urbano, e também para estudar o impacto destas mesmas medidas no consumo de energia dos edifícios, sendo para tal conjugado com outros softwares. Christopher O'Malley et al (2015) recorreram ao ENVI-met para simular várias hipóteses de medidas de mitigação do efeito de IUC num bairro em Londres. G. Evola et al. (2017) utilizaram o ENVI-met para estudarem várias estratégias para melhorar o conforto térmico em bairros antigos e densos, na zona de Avola, Itália. C. P.Skelhorn et al. (2016) simularam, através da conjugação dos softwares ENVI-met e IES-VE, vários cenários com alterações na vegetação em ruas de Manchester, de forma a estudar o impacto destas alterações na carga de arrefecimento dos edifícios.

Por todos os motivos referidos acima, o ENVI-met apresenta-se como o software ideal para a simulação de microclimas urbanos.

3.4. Funcionamento do ENVI-MET

Todas as informações relativas ao funcionamento do software ENVI-met referidas nesta secção (3.4) são baseadas na dissertação “Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-met” de Sebastian Huttner, 2012.

As principais variáveis calculadas pelo ENVI-met, de acordo com *Bruse e Fler* (1998), são:

- Velocidade e direção do vento;
- Humidade do ar e do solo;
- Temperatura do ar e do solo;
- Turbulência;
- Fluxos radiativos;
- Dispersão de partículas e gases.

Na Figura 6 estão representadas as diferentes componentes que afetam as variáveis referidas.

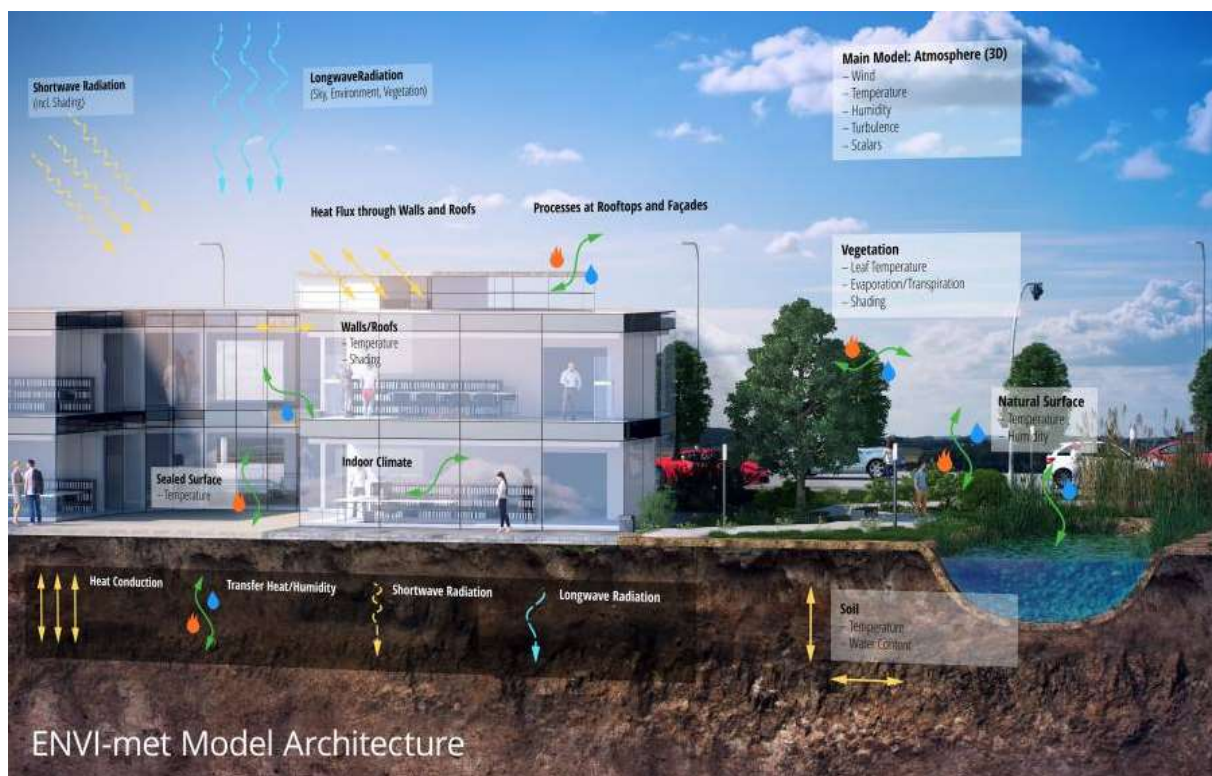


Figura 6-Esquema dos submodelos existentes no ENVI-met (ENVI-met).

3.4.1. Fluxo de vento

Para o cálculo do desenvolvimento espacial e temporal da direção e velocidade do vento o ENVI-met utiliza as equações não-hidrostáticas e tridimensionais de Navier-Stokes. Para simplificar o efeito o da pressão é utilizada a aproximação de Boussinesq:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u_i \frac{\partial u}{\partial x_i} = - \left(\frac{\partial p'}{\partial x} \right) + K_m \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2} \right) + f(v - v_g) - S_u \quad [3.1]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u_i \frac{\partial v}{\partial x_i} = - \left(\frac{\partial p'}{\partial y} \right) + K_m \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x_i^2} \right) + f(u - u_g) - S_v \quad [3.2]$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u_i \frac{\partial w}{\partial x_i} = - \left(\frac{\partial p'}{\partial z} \right) + K_m \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x_i^2} \right) + g \frac{\theta(z)}{\theta_r \text{ef}(z)} - S_w \quad [3.3]$$

onde u, v e w representam as componentes zonal, meridional e vertical do deslocamento do ar, respetivamente, p' representa a perturbação da pressão, v_g e u_g as componentes meridional e zonal do vento geostrófico, K_m o coeficiente de troca local, f a força de Coriolis, S um coeficiente de ganho ou perda de quantidade devido ao atrito causado por obstáculos semipermeáveis, g a gravidade, a temperatura potencial. Os índices i no termo da advecção do vento remetem à convenção de Einstein, que é utilizada de modo a simplificar as equações.

Embora o ENVI-met tenha em consideração o parâmetro de Coriolis, este é desativado por defeito, de forma a simplificar os cálculos. Para facilitar o sistema de equações, o ar é considerado um fluido incompressível.

Ainda, o ENVI-met resolve as equações diferenciais através do método das diferenças finitas:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} \rightarrow \frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t} \quad [3.4]$$

3.4.2. Temperatura e humidade

O ENVI-met determina tanto a temperatura potencial (θ) como a humidade (q) através da equação da advecção-difusão:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_i \frac{\partial \theta}{\partial x_i} = K_h \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x_i^2} \right) + \frac{1}{c_p \rho} \frac{\partial R_{lw}}{\partial z} + Q_\theta \quad [3.5]$$

sendo K_h o coeficiente de turbulência devido a variações térmicas, Q_θ a troca de calor entre o ar e a vegetação, e $\frac{1}{c_p \rho} \frac{\partial R_{lw}}{\partial z}$ a variação da temperatura do ar devido à divergência da radiação de onda longa.

O software considera a troca de calor e humidade entre o ar e a vegetação (para a equação da temperatura e da humidade, respetivamente), assim como o coeficiente de variação de turbulência para ambas as componentes. No entanto, não reconhece a condensação e vaporização da água, pelo que a humidade irá ser sempre inferior a 100%.

3.4.3. Turbulência atmosférica

A simulação da turbulência atmosférica é baseada no trabalho de Mellor e Yamada [1974;1982]:

$$\frac{\partial E}{\partial t} + u_i \frac{\partial E}{\partial x_i} = K_E \left(\frac{\partial^2 E}{\partial x_i^2} \right) + Pr - Th + Q_E - \epsilon \quad [3.6]$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = K_\epsilon \left(\frac{\partial^2 \epsilon}{\partial x_i^2} \right) + c_1 \frac{\epsilon}{E} Pr - c_3 \frac{\epsilon}{E} Th - c_2 \frac{\epsilon^2}{E} + Q_\epsilon \quad [3.7]$$

em que c_1 , c_2 e c_3 são constantes empíricas, com os valores de 1.44, 1.92 e 1.44, respetivamente (Launder e Spalding, 1974); E corresponde à turbulência, e ϵ à sua dissipação; Pr representa a dissipação de turbulência por *wind shearing* e Th por estratificação térmica, e K_E e K_ϵ os coeficientes de difusão.

3.4.4. Radiação

Os ganhos e perdas de radiação pela atmosfera são definidos pelos coeficientes de emissão e absorção de diferentes camadas atmosféricas. Para esta consideração, o ENVI-met realiza uma simplificação em que apenas considera o vapor de água, desprezando assim o efeito dos aerossóis, dióxido de carbono, ozono, entre outros gases de efeito estufa.

Os fluxos de radiação são bastante afetados pela vegetação e sombras dos edifícios, pelo que o software considera um coeficiente entre 0 e 1 para medir o efeito das sombras e radiação, sendo o valor 0 correspondente a um bloqueio total do fluxo radiativo e 1 ao fluxo radiativo sem qualquer interferência por sombreamentos ou vegetação. O cálculo da radiação de *longwave* e *shortwave* é efetuado de acordo com os cálculos de Paltridge e Platt (1976):

$$Q_{sw}(z) = \sigma_{sw,dir}(z)Q_{sw,dir}^0 + \sigma_{sw,dif}(z)\sigma_{svf}(z)Q_{sw,dif}^0 + (1 - \sigma_{svf}(z))Q_{sw,dir}^0 \cdot \bar{\alpha} \quad [3.8]$$

$$Q_{lw}^\downarrow(z) = \sigma_{lw}^\downarrow(z, z_p)Q_{lw}^{\downarrow 0} + (1 - \sigma_{lw}^\downarrow(0, z))\epsilon_f \sigma_B \bar{T}_{f+}^4 + (1 - \sigma_{svf}(z))Q_{lw}^\leftrightarrow \quad [3.9]$$

$$Q_{lw}^\uparrow(z) = \sigma_{lw}^\uparrow(0, z_p)\epsilon_s \sigma_B T_0^4 + (1 - \sigma_{lw}^\uparrow(0, z))\epsilon_f \sigma_f \bar{T}_{f-}^4 \quad [3.10]$$

onde $Q_{sw,dir}^0$ e $Q_{sw,dif}^0$ representam a radiação de *shortwave* direta e difusa (respetivamente) no topo do modelo; $\sigma_{sw,dir}$, $\sigma_{sw,dif}$ os coeficientes da influência da vegetação na radiação de *shortwave* direta e difusa, respetivamente; ϵ_f e ϵ_s representam a emissividade da folhagem e da superfície; σ_{lw}^\downarrow e σ_{lw}^\uparrow os coeficientes da influência da vegetação na radiação de *longwave* descendente e ascendente; Q_{lw}^\leftrightarrow o fluxo de radiação horizontal de *longwave* (proveniente das paredes), e \bar{T}_{f+}^4 e \bar{T}_{f-}^4 a temperatura média da superfície superior e inferior da folhagem, respetivamente.

3.4.5. Modelo do Solo

O modelo do solo do ENVI-met considera apenas os fluxos verticais de temperatura e humidade, e determina a humidade e a temperatura do solo até 1,75 metros de profundidade. A partir de uma profundidade superior a 1,75m, o efeito da variação de temperatura e humidade na atmosfera é considerada desprezável para períodos de simulação de três ou menos dias. O cálculo da quantidade de água presente no solo, assim como a temperatura do mesmo, são determinadas pela Equação 3.11 e 3.12:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = k_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \quad [3.11]$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = D_\eta \frac{\partial^2 \eta}{\partial z^2} + \frac{\partial K_\eta}{\partial z} - S_\eta(z) \quad [3.12]$$

onde T_s é a temperatura do solo, η a quantidade de volume de água no solo, K_η o coeficiente de turbulência em relação a η , e k_s a difusidade térmica do solo, constante no caso de solos impermeáveis e dependente da humidade η no caso dos restantes solos.

Para o cálculo da temperatura à superfície do solo (T_0) o modelo utiliza a equação do balanço de energia ao nível do solo:

$$Q_{sw,net} + R_{lw,net}(T_0) - G(T_0) - H((T_0) - LE(T_0, q_0) = 0 \quad [3.13]$$

onde $Q_{sw,net}$ é o balanço de radiação de *shortwave* na superfície, $Q_{lw,net}$ o balanço de radiação de *longwave* na superfície, G o fluxo de calor do solo, H é o fluxo de calor sensível e LE o fluxo de calor latente à superfície.

3.4.6. Modelo da vegetação

No caso da vegetação o software considera a altura das plantas e a densidade de área foliar (LAD) para determinar a interação desta componente com os modelos da radiação, do solo e atmosférico. O fluxo de calor, evaporação e transpiração são dados pelas equações 3.14, 3.15 e 3.16, respetivamente:

$$J_{f,h} = 1.1 r_a^{-1}(T_f - T_a) \quad [3.14]$$

$$J_{f,evap} = r_a^{-1} \Delta q \delta_c f_w + r_a^{-1}(1 - \delta_c) \Delta q \quad [3.15]$$

$$J_{f,trans} = \delta_c (r_a + r_s)^{-1}(1 - f_w) \Delta q \quad [3.16]$$

Onde T_f é a temperatura da folhagem, T_a é a temperatura do ar, Δq representa a variação de humidade $\Delta q = q^* T_a - q_a$, onde q^* representa o valor de saturação da humidade específica na superfície da folhagem e q_a a humidade específica do ar. r_a corresponde à resistência aerodinâmica e δ_c um valor entre 0 e 1 que corresponde à possibilidade de existir evapotranspiração ($\delta_c=1$) ou não ($\delta_c=0$).

3.4.7. Forçamento simples no ENVI-met

O ENVI-met permite o forçamento de uma elevada quantidade de variáveis, para que exista versão forçada, ou simples. As variáveis que podem ser forçadas são a velocidade e a direção inicial do vento, a temperatura potencial e humidade do ar, a radiação direta e difusa de onda curta, a radiação de onda longa e a cobertura por nuvens.

3.5. Funcionalidades do ENVI-met

Devido à complexidade do software, o ENVI-met divide-se em várias funcionalidades (*tools*) que permitem uma análise completa do estudo realizado. Estas funcionalidades estão centradas no *Headquarter*, uma barra de funcionalidades do ENVI-met, como está representado na Figura 7.

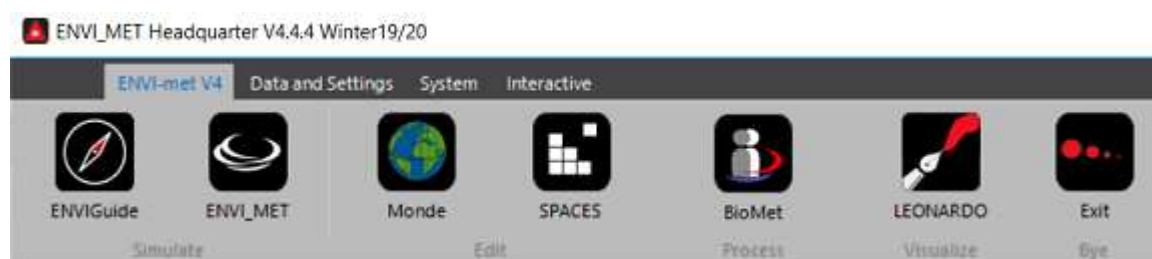


Figura 7- Menu de funcionalidades do ENVI-met (*Headquarter*).

De forma a compreender a funcionalidade de cada uma no estudo realizado, segue-se um pequeno resumo das suas funções.

3.5.1. Definição de variáveis no módulo Database Manager

Nesta funcionalidade é possível visualizar e editar as bases de dados que serão utilizadas na construção da planta de estudo. O ENVI-met permite ao utilizador criar os seus próprios materiais, espécies de vegetação, entre outra qualquer componente que possa vir a ser utilizada na zona de estudo. Disponibiliza também uma vasta base de dados de materiais utilizados com maior frequência em construções de edifícios, assim como a vegetação e tipos de solo mais comuns no meio urbano.

Para o caso de estudo, foram introduzidos novos materiais na base de dados, correspondentes à típica construção de um edifício da zona de estudo, e também a um modelo de um painel fotovoltaico. Para o efeito, foram considerados os materiais apresentados na Tabela 1 e Tabela 2, respetivamente.

Tabela 1 - Características físicas dos materiais utilizados para a construção da parede (ITE 50).

Camada	Espessura, (cm)	Densidade, (kg/m ³)	Condutividade térmica, (W/m ² K)	Calor específico, (J/(kg. °C))
Betão	0.02	2400	1.3	753
Tijolo	0.11	1200	0.03	837
Isolamento (lã de vidro)	0.05	51.6	0.042	669

Tabela 2- Características físicas dos materiais constituintes dos painéis fotovoltaicos (Nur Syafiqah Zhubir et al., 2017).

Camada	Espessura, (cm)	Densidade, (kg/m ³)	Condutividade térmica, (W/m ² K)	Calor específico, (J/kg. °C))
Vidro	0.3	3000	1.8	500
EVA 1	0.02	960	0.35	2090
Células PV	0.04	2330	148	677
EVA 2	0.05	960	0.35	2090
Tedlar	0.01	1200	0.2	1250

3.5.2. Módulo Spaces

Na componente Spaces foi estruturada a planta da zona de estudo. Esta função é utilizada para definir os materiais utilizados em todas as componentes da zona de estudo- solo, vegetação e edifícios- e para a construção da mesma. A área de desenho da planta é uma matriz bidimensional com coordenadas cartesianas, como está representado na Figura 8, sendo o tamanho da matriz definido pelo utilizador. O utilizador pode depois definir a altura das diferentes componentes da zona e pode visualizá-la e editá-la em duas ou três dimensões. A zona seleccionada para este estudo ocupa uma área de aproximadamente 63 000 m², com edifícios a atingir alturas de 33m, como já foi referido.

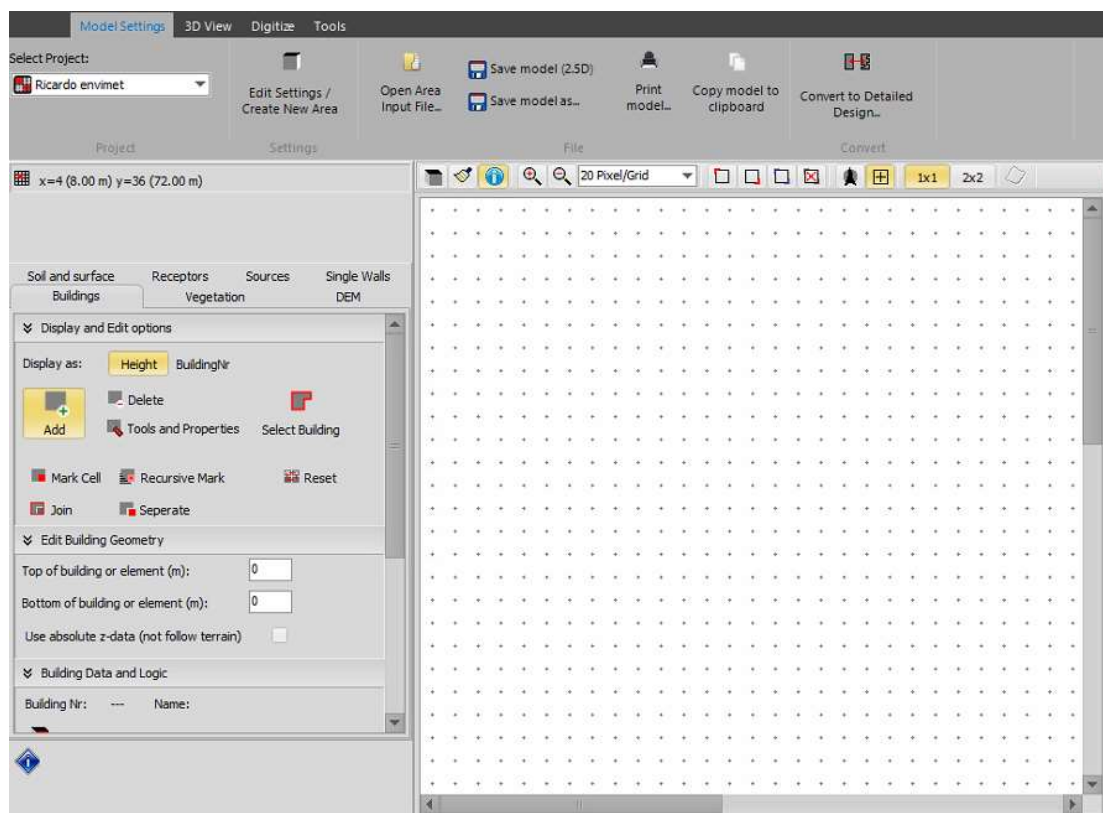


Figura 8 - Área de edição na funcionalidade Spaces.

3.5.2.1. Definição dos Solo

A primeira componente da planta a ser definida é o solo. Tendo em conta o estudo realizado da zona seleccionada para o projeto, foram utilizados os seguintes materiais:

- Asfalto, representado no Spaces por *Asphalt road*, para toda a zona de estradas existentes;
- Calçada portuguesa, representada por *Brick road (yellow stone)*, para as zonas dos passeios existentes à volta dos edifícios;
- Granito, representado por *Granit pavement*, em alguns espaços da zona de estudo.

Como se pode observar na Figura 9, o elemento mais utilizado foi o asfalto (assinalado a preto), o que corresponde ao espectável para a localidade e tendo em conta que se trata de um *canyon* urbano, com uma estrada em todo o seu comprimento. As zonas sem definição do solo representam os locais onde estão situados os edifícios.

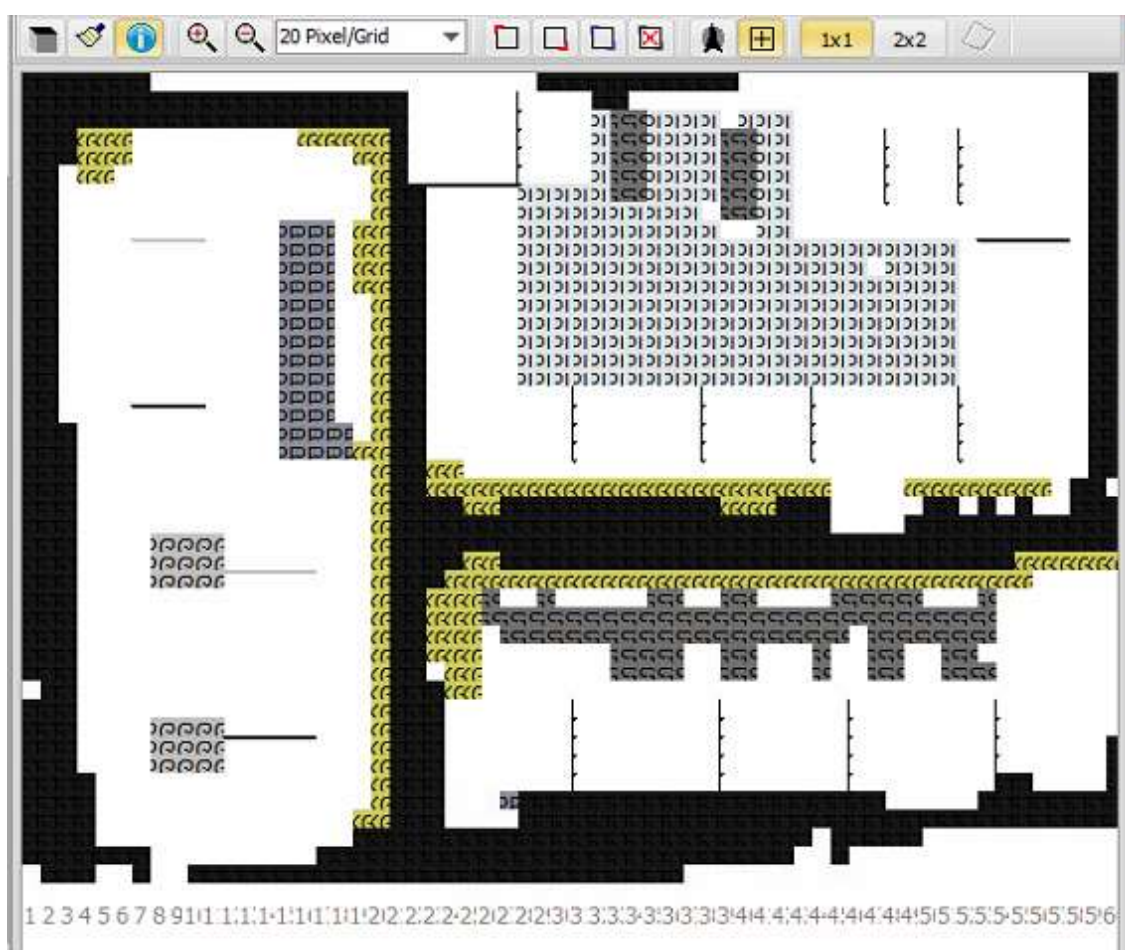


Figura 9- Representação dos tipos de solo considerados na área de estudo (preto-asfalto; cinzento claro e escuro- diferentes tipos de granito; amarelo – tijolo).

3.5.2.2. Implementação da Vegetação no modelo

De forma a definir corretamente a vegetação, Matias (2018) realizou um levantamento da vegetação existente na área de estudo, tendo sido identificados quatro diferentes tipos de vegetação considerável para o estudo:

- *Populus nigra* (Choupo Negro, assinalado a verde escuro e com sombreado na Figura 10);
- Relva densa de aproximadamente 15cm de altura;
- Árvores de 15m de altura, com folhagens bastante densas;
- Árvores de 10m de altura, densas, mas sem folhagem na base;

O próprio *canyon* urbano tem uma porção considerável de vegetação, tendo em conta a sua localização geográfica. No entanto, destaca-se a vasta vegetação existente à volta do *canyon* urbano. Embora esta vegetação não faça parte do *canyon* estudado, é bastante relevante para o balanço energético dos edifícios, pelo que foi considerada para o estudo da zona.

Dos tipos de vegetação identificados, existe apenas relva e choupo negro na área do *canyon* urbano. As árvores de 15 e 10m de altura existem à volta do *canyon*, como está representado na Figura 10.

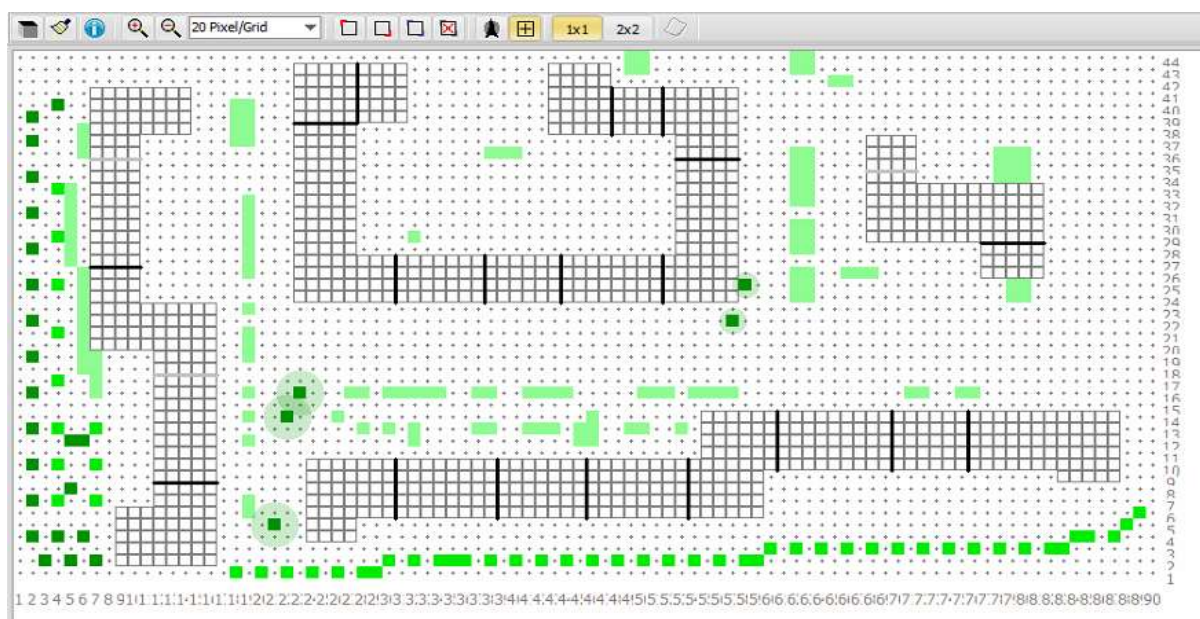


Figura 10 - Representação da vegetação presente na área de estudo.

3.5.2.3. Definição dos Recetores

Para que seja possível visualizar e estudar os resultados referentes à temperatura potencial com maior facilidade e precisão, é necessário definir a existência de recetores na planta, assim como a sua localização. Foram definidos 6 recetores, com a localização de acordo com a Figura 11. Os recetores foram colocados de forma a ser possível analisar a temperatura em todo o *canyon* urbano, assim como nas imediações do mesmo.

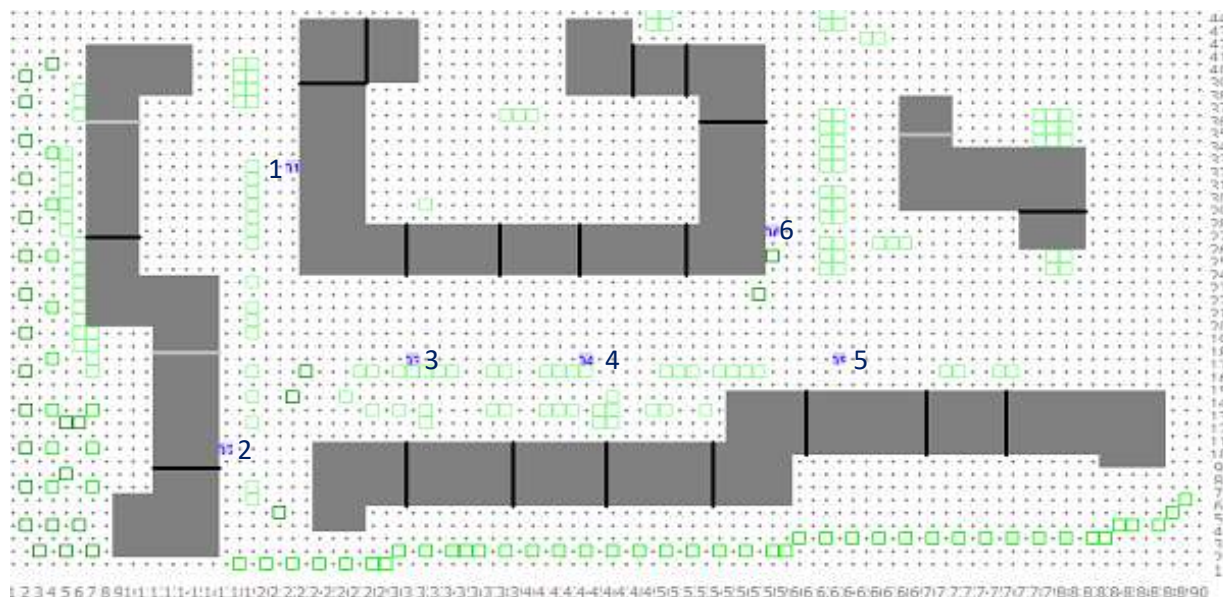


Figura 11 - Representação dos recetores inseridos na planta.

3.5.2.4. Definição dos materiais das fachadas dos Edifícios

A correta definição dos materiais constituintes dos edifícios é bastante importante neste estudo, uma vez que vai ser a componente da planta mais estudada e considerada. Inicialmente foi definida uma fachada composta por reboco, isolamento térmico e tijolo, como foi referido no ponto 3.5.2. Tendo em conta as características físicas dos diferentes materiais referidos, indicadas na Tabela 1, definiu-se uma parede para as fachadas com as características apresentadas na Figura 12.

Esta junção dos materiais em apenas um equivalente deve-se à impossibilidade de criar paredes no ENVI-met com mais de três camadas. O ENVI-met estima a temperatura das fachadas em sete pontos, como representado na Figura 13, pelo que a parede deve sempre ser composta por três camadas.

Database-ID:	[000001]
Name:	low absorption
Color:	
Parameter	Value
Default Thickness	0.30000
Absorption	0.30000
Transmission	0.00000
Reflection	0.70000
Emissivity	0.90000
Specific Heat	820.00000
Thermal Conductivity	0.21000
Density	1100.00000
Extra ID	0

Figura 12 - Material idealizado para as paredes das fachadas.

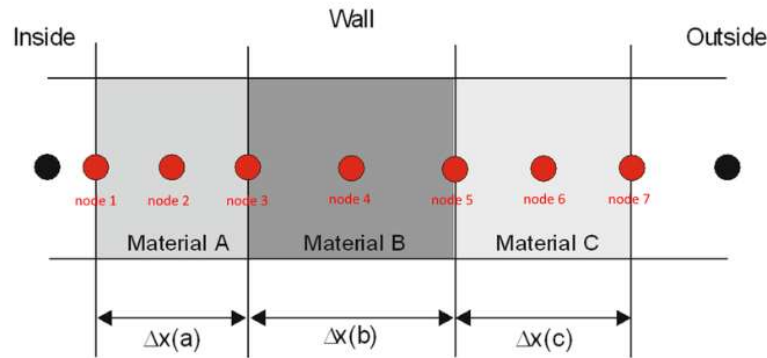


Figura 13- Representação dos pontos de medição de Temperatura numa fachada (Helge Simon et al., 2017).

Uma vez que foi necessário implementar painéis solares fotovoltaicos neste estudo, efetuou-se a equivalência referida de forma a que fosse possível acrescentar tanto a camada composta por painéis fotovoltaicos como a camada de ar entre os painéis e a fachada.

Como na base de dados do ENVI-MET ainda não existem painéis fotovoltaicos, e não é possível recriar esta estrutura, simulou-se um painel de uma superfície com uma absorção de 0,70, de forma a que, de uma forma simples, mas próxima da realidade, fosse possível simular a absorção de radiação solar. A Figura 14 apresenta o material utilizado para a simulação de um painel fotovoltaico (considerando os materiais referidos na Tabela 2). Como se pode ver na figura, a soma da absorção da energia, da refletividade e transmissividade não é igual a 1, mas sim 0,8. Os restantes 0,2 foram considerados que seriam convertidos em eletricidade, sendo, portanto 0,2 a eficiência do painel.

Database-ID:	[000PVR]
Name:	PVreal
Color:	
Parameter	Value
Default Thickness	0.01000
Absorption	0.70000
Transmission	0.00000
Reflection	0.10000
Emissivity	0.84000
Specific Heat	738.28003
Thermal Conductivity	0.15000
Density	3000.00000
Extra ID	0

Figura 14 - Material idealizado para a simulação de um painel fotovoltaico.

Nas janelas foram considerados vidros simples, enquanto que nos telhados foram utilizados betão ou telhas, dependendo do edifício. Na Figura 15 pode visualizar-se a planta final sem penetração de PV, através de uma perspetiva tridimensional. As plantas das restantes simulações podem ser analisadas no Anexo 3.

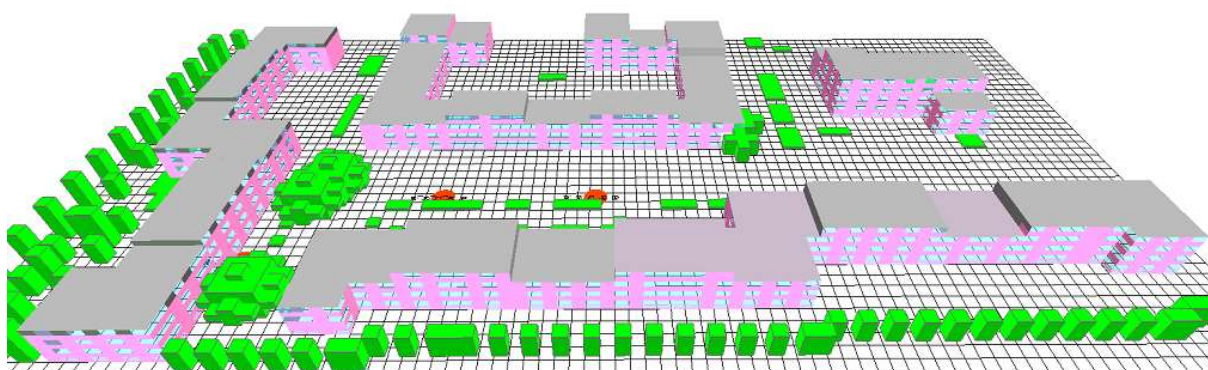


Figura 15- Representação da planta estudada, criada através do *Spaces*.

3.5.2.5. Módulo Envi-Guide

Depois de finalizar a planta na plataforma *Spaces*, é necessário definir as condições atmosféricas de partida e o forçamento no dia inicial da simulação, através da função Envi-Guide. A partir dos dados introduzidos e considerando a planta escolhida para a simulação, o Envi-met simula a temperatura do restante período de simulação definido. Ainda, deve-se introduzir os dados meteorológicos do dia anterior ao pretendido, uma vez que as primeiras 24 horas simuladas servem para ajustar valores, estabelecer variáveis e prever padrões. Neste caso de estudo, por exemplo, visto que o dia a ser simulado é o dia 7 de julho, deverá ser estabelecida a data de início da simulação como dia 6 do mesmo mês.

É possível realizar a simulação em três níveis diferentes de especificidade: Básico, Intermédio e Avançado. Para todas as simulações realizadas foi escolhido o modo Avançado, uma vez que permite uma simulação mais meticulosa e completa, com uma maior variedade de dados iniciais a introduzir, de forma a obter resultados mais precisos. Os dados iniciais a introduzir para o nível de simulação escolhido são a temperatura ambiente ao longo do primeiro dia a simular, a humidade relativa e a velocidade e direção do vento (em graus), como é representado na Tabela 3 e Figura 16. O modo Avançado permite ainda utilizar *Simple* ou *Full forcing* para as condições de fronteira da planta a utilizar. A utilização de *Simple Forcing* permite definir a temperatura e a humidade relativa inicial, para além dos dados horários de temperatura e humidade relativa, e ainda o vento, a radiação e a cobertura por parte de nuvens existentes. O *Full Forcing* é utilizado para simulações de um maior período, enquanto que o *Simple Forcing* é indicado para simulações de um ou dois dias (como o caso do estudo atual). Assim, para este estudo, foram definidas as condições para a utilização do *Simple Forcing*.

Tabela 3- Condições a definir ao utilizar o modo Avançado com Simple Forcing.

Vento (u,v,w)	Velocidade do vento medido a uma altura de 10m	3.00 m/s	
	Direção do vento	3.00°	0° = Norte ... 180° = Sul
	Rugosidade local	0.010m	
Temperatura (T)	Temperatura mínima	18.79 °C	
	Temperatura máxima	26.67 °C	
Humidade (q)	Humidade relativa mínima aos 2 metros	53.90 %	
	Humidade relativa máxima aos 2 metros	85.60 %	

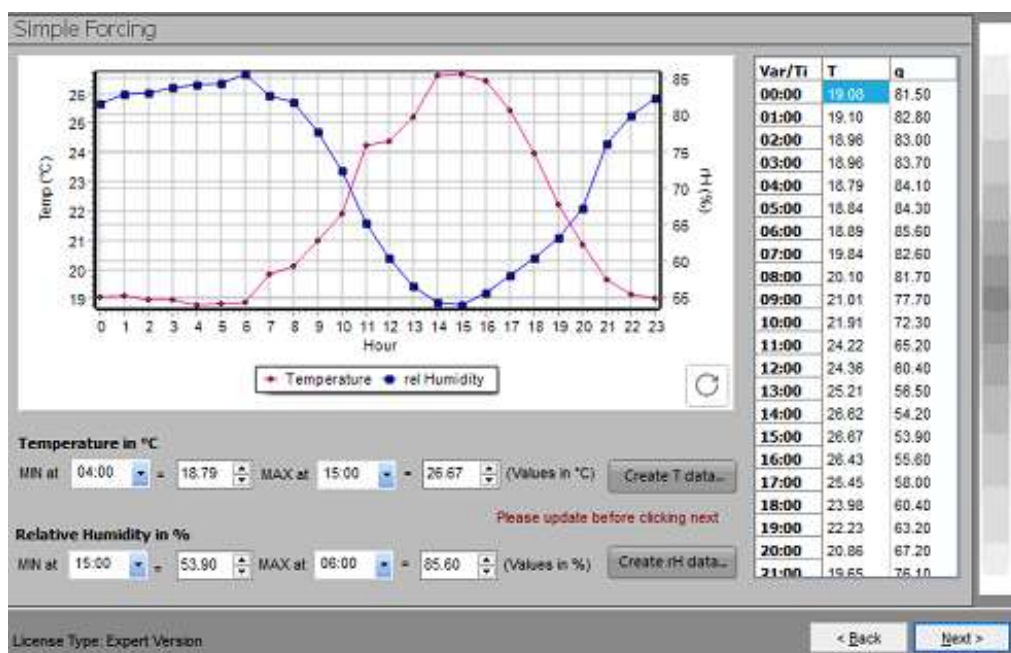


Figura 16 -Introdução dos dados de temperatura e humidade relativa do primeiro dia a simular.

No Envi-Guide é também possível editar os outputs da simulação e definir quais os que se pretende estudar com mais detalhe, como é representado na Figura 17. Para as simulações realizadas, e considerando o objetivo do estudo, foram apenas editadas as condições do output, para obter intervalos de tempo de acordo com o pretendido (de 30 em 30 minutos) e da Building Indoor Temperature, para que a temperatura do interior dos edifícios, assim como dos materiais das suas fachadas, variem de acordo com a Temperatura exterior. Após este último passo é possível iniciar a simulação.

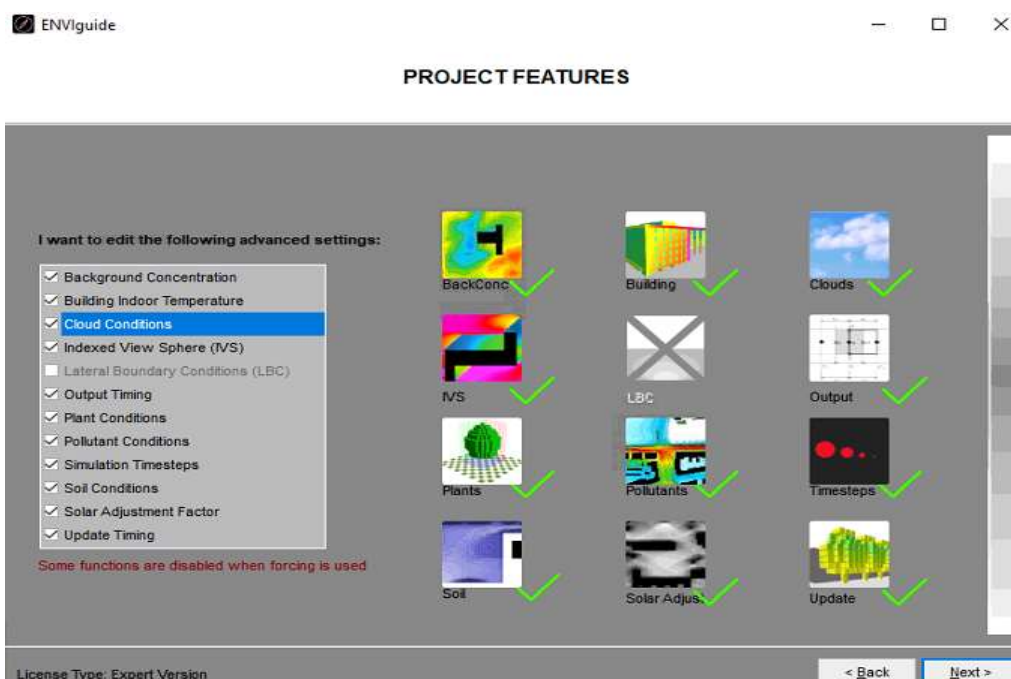


Figura 17- Propriedades editáveis da simulação e do output.

3.5.3. Módulo de visualização Leonardo

Após a simulação estar concluída, prossegue-se à visualização dos resultados. A plataforma Leonardo é utilizada para estudar os diferentes resultados da simulação relacionados com os edifícios, vegetação e solo. No caso do presente estudo, foram estudados apenas os resultados da simulação relacionados diretamente com os edifícios e a instalação de PV, especificamente a temperatura da fachada, como é representado na Figura 18, assim como a temperatura medida nos recetores colocados na planta do *canyon*, e também obtida através de imagens em duas dimensões com a representação da temperatura da atmosfera e dos edifícios, como é representado na Figura 19.

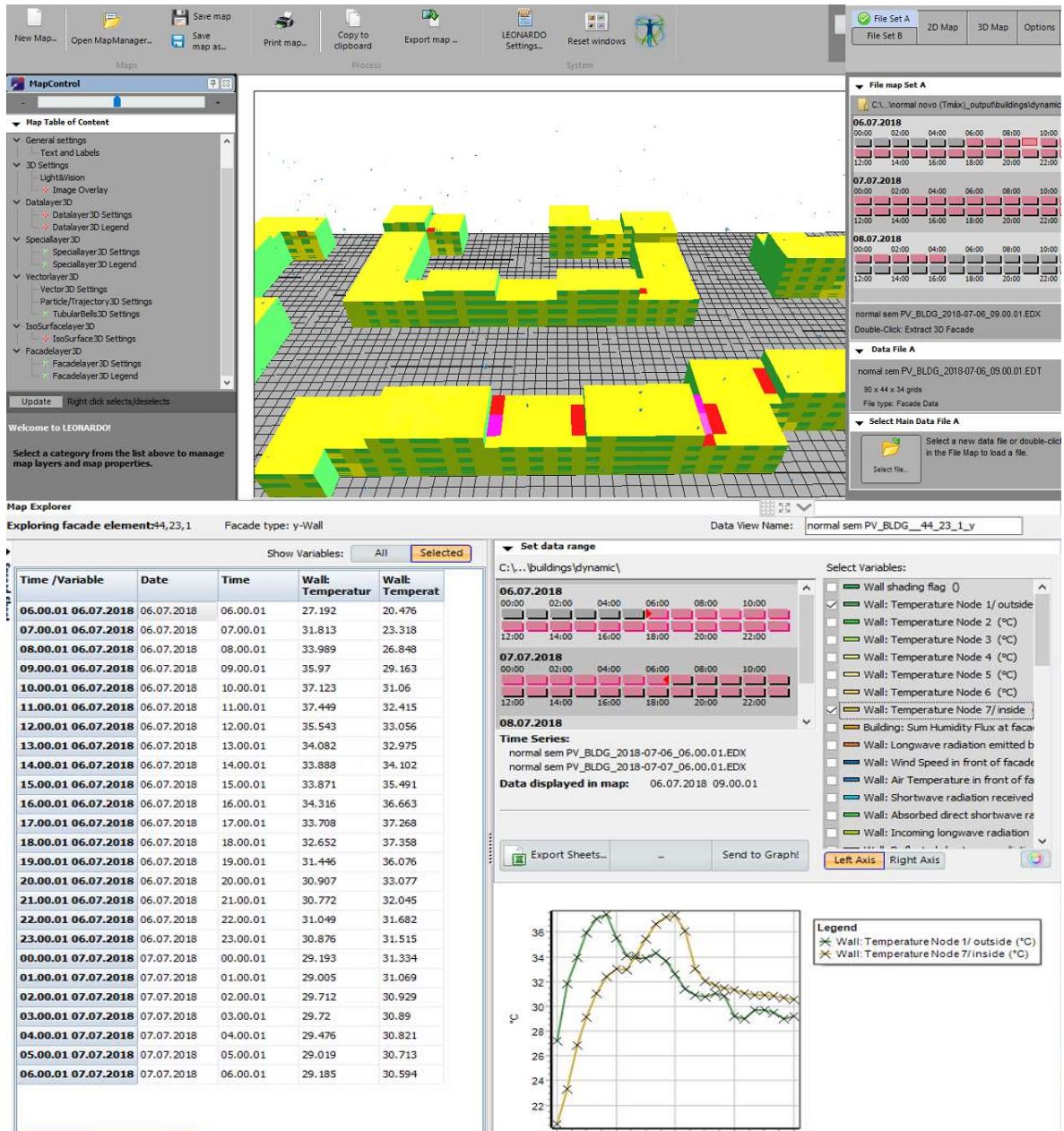


Figura 18 - Resultados analisados na funcionalidade Leonardo.

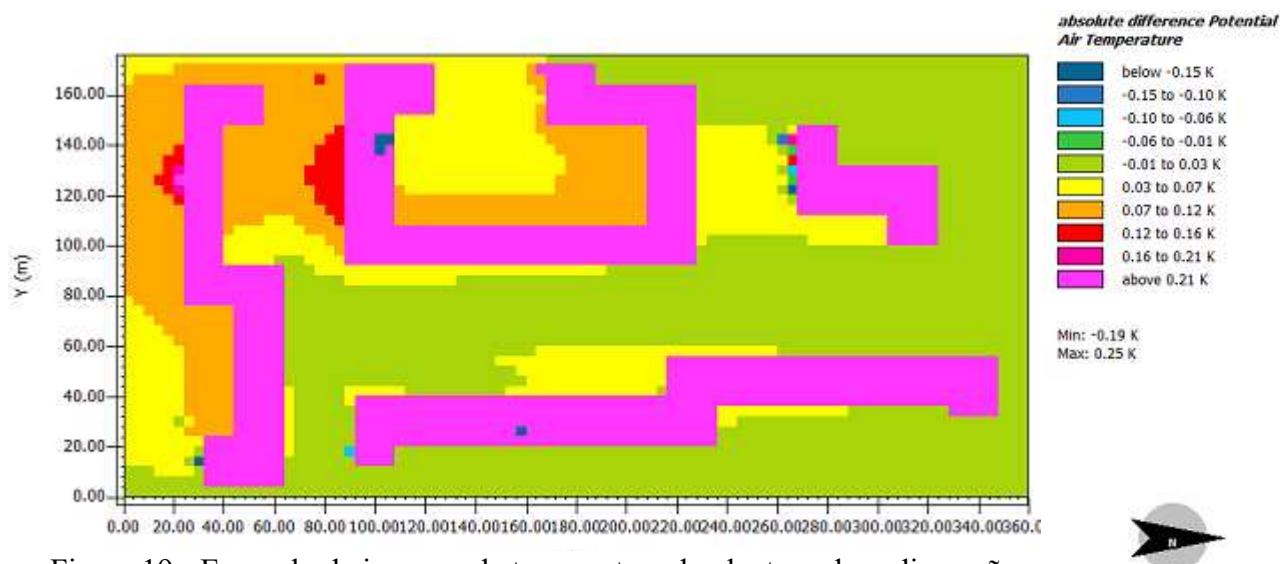


Figura 19 - Exemplo de imagem da temperatura da planta, a duas dimensões.

Como já foi referido, embora fosse relevante para uma etapa mais avançada deste estudo, o ENVI-met não permite uma visualização realista do efeito dos painéis fotovoltaicos no interior do edifício. Uma das principais razões é a definição do edifício, que é representado como um cubo vazio no interior, sem definições de paredes ou tetos a dividir as diferentes frações. Desta forma, a temperatura no interior do edifício não pode ser considerada, sendo esta bastante superior à expectável.

4. Resultados

Como foi referido anteriormente, foram simulados quatro cenários: cenário sem integração de painéis fotovoltaicos (NPV- *no photovoltaic panels*); cenário apenas com a integração de painéis no telhado (RPV- *roof with photovoltaic panels*); apenas nas fachadas (FPV- *facade with photovoltaic panels*) e 100% integração de painéis (BIPV- *Building integrated photovoltaic*). Para cada um dos cenários, foi estudada a temperatura das fachadas, e a temperatura ambiente, simulada pelos recetores implementados na zona de estudo. Os resultados estudados foram medidos a uma altura de 1,80m, de forma a analisar a diferença na temperatura na camada limite inferior. Embora neste capítulo estejam apenas representados os gráficos dos valores obtidos, as imagens térmicas dos resultados também se encontram no Anexo 3, para as horas com a maior e menor diferença de temperatura entre os vários Cenários.

De forma a conseguir fazer uma análise completa da temperatura de todas as fachadas nos quatro cenários, foram estudadas as temperaturas das fachadas indicadas na Figura 20.

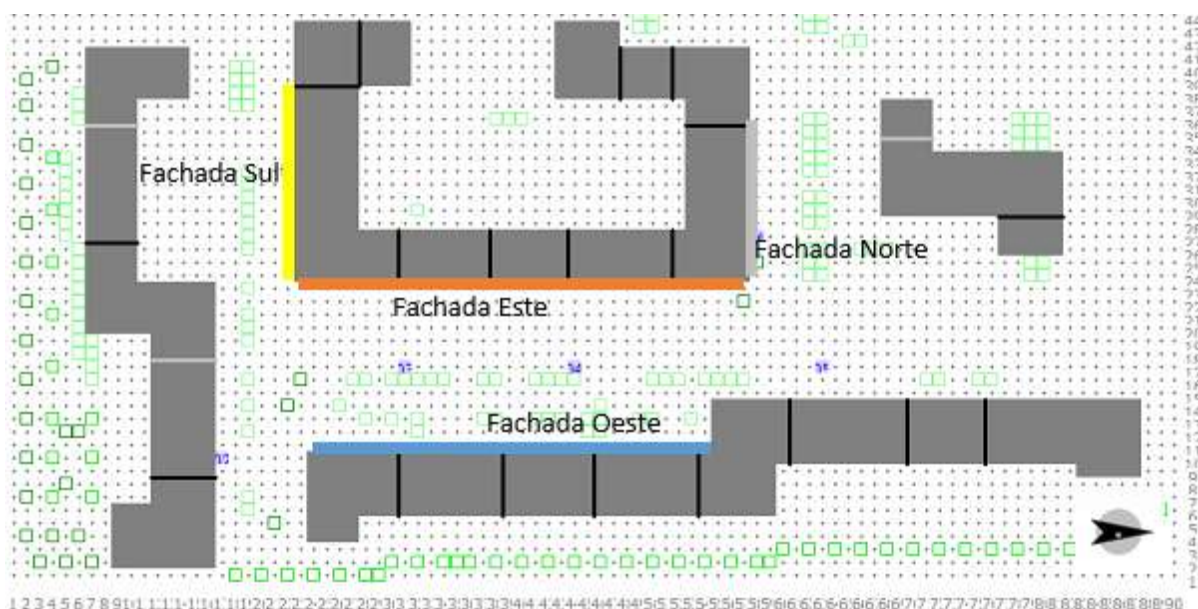


Figura 20 - Identificação das fachadas consideradas para a análise de dados.

4.1. Temperatura das fachadas

A primeira planta a ser simulada foi a do cenário NPV, de forma a obter o resultado que servirá de base de comparação com os restantes cenários. Após a simulação, foram obtidos os resultados representados na Figura 21.

Tendo em conta que o Sol nasce a Este e põe-se a Oeste, a fachada Este é a primeira a ser incidida pela radiação solar. Como se pode verificar na Figura 21, esta incidência leva a um aumento da temperatura da fachada Este na parte da manhã (entre as 7 e as 11h).

A fachada Oeste, por outro lado, apresenta um aumento de temperatura acentuado entre as 12h e as 16h, devido à incidência de radiação solar na parte da tarde sobre a fachada.

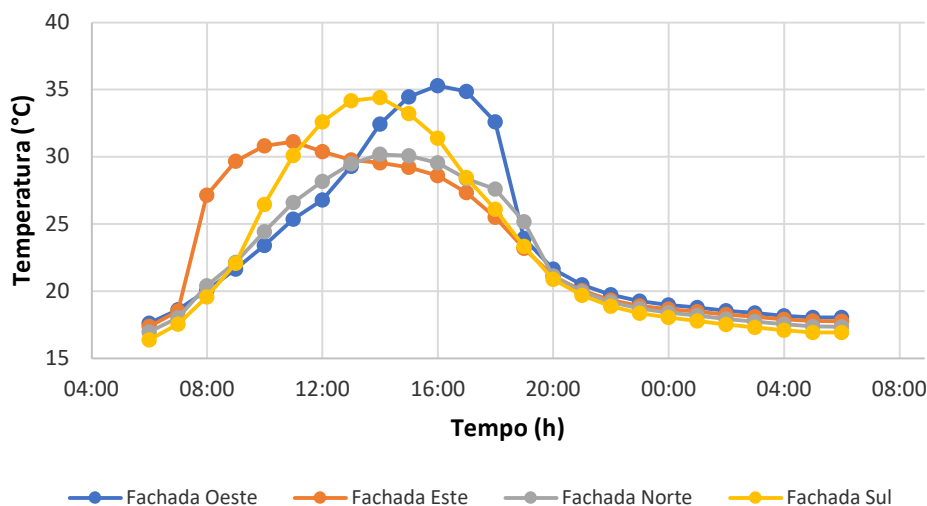


Figura 21 - Perfil de temperatura das fachadas no dia 7 de julho, cenário *no photovoltaic panels* (NPV).

A fachada Sul apresenta uma variação de temperatura mais uniforme e contínua ao longo do dia, devido à constante incidência de radiação solar, e a fachada Norte atinge temperaturas mais baixas comparando com as outras fachadas pelo motivo contrário: não recebe radiação solar direta durante todo o dia.

Com os resultados do Cenário NPV já obtidos e analisados, pode-se prosseguir para a comparação das temperaturas com e sem painéis fotovoltaicos.

No Cenário RPV, os perfis de temperatura das fachadas são bastante semelhantes aos do Cenário NPV, como é representado na Figura 22, o que indica que a implementação de painéis apenas nos telhados não afeta significativamente a temperatura das fachadas, resultando apenas num ligeiro aumento da temperatura das fachadas face ao Cenário NPV.

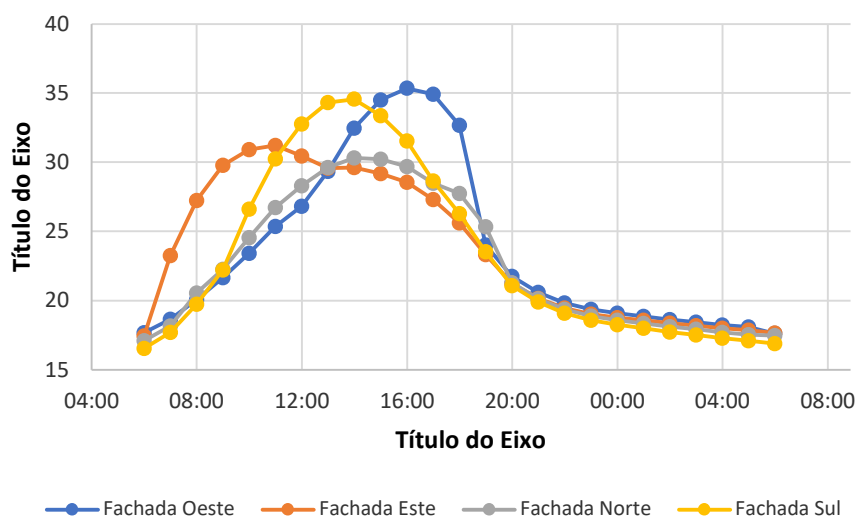


Figura 22- Perfil de temperatura das fachadas no cenário *roof with photovoltaic panels* (RPV).

De modo a analisar mais pormenorizadamente as diferenças entre a temperatura das fachadas no Cenário RPV e no Cenário NPV, calculou-se a diferença absoluta entre as temperaturas registadas em ambos os Cenários, cujo resultados se apresentam na Figura 23. Esta diferença varia entre os 0 e os 0,25°C, o que não é muito significativo em variações de temperatura, considerando apenas o *canyon* urbano (no efeito da IUC pode ser significativo). Esta observação era espetável, visto que não há alteração na estrutura das fachadas entre o Cenário RPV e o Cenário NPV.

A fachada que apresenta um maior aumento de temperatura é a fachada Sul (0,15°C-0,22°C), enquanto que a que apresenta um menor aumento é a fachada Oeste (0,02°C-0,12°C). À exceção da fachada Oeste, os perfis da diferença de temperatura das fachadas são aproximadamente uniformes.

Durante o período noturno, é notável que o aumento de temperatura é superior em relação ao aumento que ocorre durante o período diurno, devido à libertação de energia pelos edifícios para a atmosfera, de forma a atingir o equilíbrio térmico com a vizinhança.

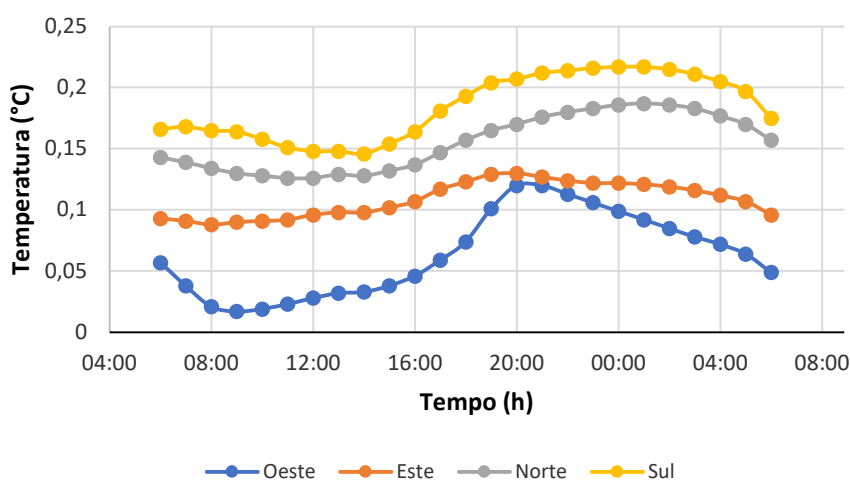


Figura 23- Variação de temperatura das fachadas no cenário *roof with photovoltaic panels* (RPV) em relação ao cenário *no photovoltaic panels* (NPV).

A Figura 24 representa o perfil de temperatura das fachadas no cenário FPV. Como se pode observar, no cenário FPV as curvas de temperatura das fachadas diferem em relação às do cenário NPV.

Com a implementação de painéis fotovoltaicos nas fachadas, é visível um atraso nos máximos de temperatura, de aproximadamente 1-2h, à exceção da fachada norte que apresenta um atraso de 6h. Este fenómeno ocorre devido à existência de painéis entre as fachadas e a envolvente, que captam parte da radiação solar incidente, o que resulta no seu aquecimento, e consequente emissão de calor para a camada de ar entre os painéis e as paredes dos edifícios. Esta transferência de calor resulta num aquecimento gradual da temperatura das fachadas, o que justifica o desfaseamento dos máximos relativamente ao cenário NPV. Ainda, os máximos das fachadas Este e Oeste aumentaram cerca de 5°C, enquanto que os máximos das fachadas Norte e Sul aumentaram cerca de 2-3°C

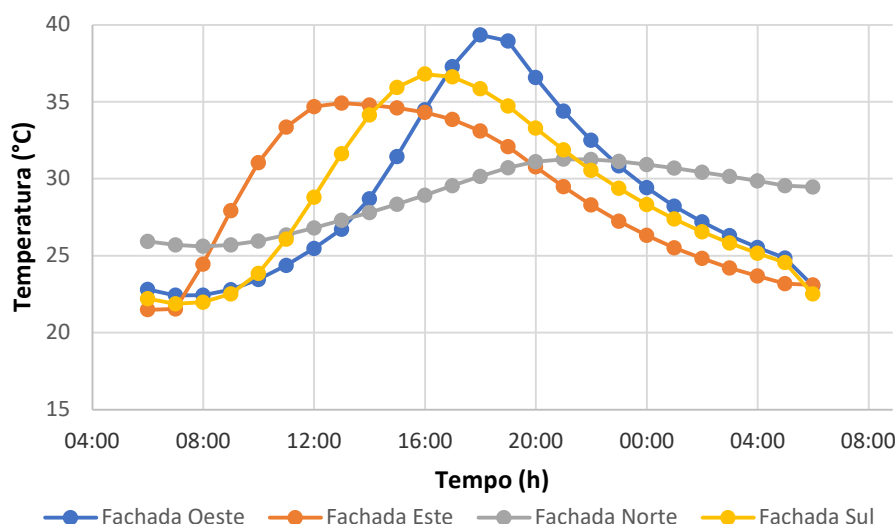


Figura 24- Perfil de temperatura das fachadas no cenário *facade with photovoltaic panels* (FPV).

Relativamente aos valores mínimos deste cenário, também se verifica um aumento face aos valores mínimos do cenário NPV. Este aumento deve-se ao facto de que no cenário NPV, após a exposição solar, ocorre um decréscimo abrupto na temperatura das fachadas, enquanto que no cenário FPV esta variação é mais gradual. Isto ocorre porque no cenário NPV as paredes dos edifícios dissipam mais calor à medida que a temperatura ambiente diminui, de modo a que exista um equilíbrio térmico entre os dois sistemas. No cenário FPV, as paredes dos edifícios dissipam menos calor devido ao confinamento provocado pelos painéis, que cria uma camada de ar mais quente que a temperatura ambiente. Enquanto que durante o período diurno a temperatura dos painéis excede a temperatura dos edifícios, durante o período noturno ocorre o oposto, sendo que à medida que o painel arrefece, as paredes dos edifícios dissipam o calor acumulado, de modo a manter o equilíbrio térmico. Este equilíbrio é atingido a cerca de 22°C, o que vai condicionar a temperatura de madrugada, que associada à maior temperatura que os painéis atingem aquando a incidência da radiação solar, pode justificar o aumento da temperatura nas restantes horas do dia.

Outra diferença entre os cenários NPV e FPV é o perfil de temperatura da fachada Norte. Enquanto que no cenário NPV a fachada Norte apresenta uma variação de temperatura, ao longo do dia, semelhante ao das outras fachadas, no cenário FPV esta fachada apresenta um perfil de temperatura mais uniforme, com os valores a variar entre os 25°C e os 30°C. Apesar da curva do cenário FPV parecer bastante diferente da curva das restantes fachadas, esta representa o mesmo comportamento, no entanto devido à orientação desta fachada, a mesma apenas capta radiação solar difusa, o que faz com que o equilíbrio térmico entre o painel e a fachada seja uniforme ao longo do dia.

De forma a comparar melhor os dois cenários, realizou-se o mesmo procedimento que nos cenários anteriores, ou seja, calculou-se a diferença absoluta da temperatura das fachadas entre o cenário NPV e FPV, cujos resultados se encontram representados na Figura 25. Como se pode ver nesta figura, e como foi analisado anteriormente, com a implementação de painéis nas fachadas, a temperatura destas tende a aumentar, à exceção de determinados períodos, que correspondem ao desfaseamento dos picos de temperatura entre os cenários, explicado anteriormente.

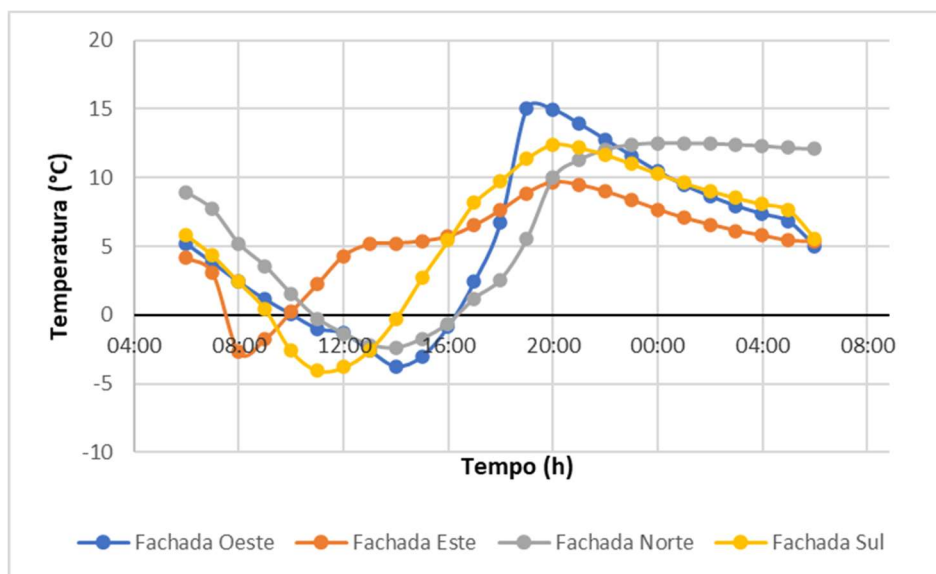


Figura 25- Variação de temperatura das fachadas no cenário *facade with photovoltaic panels* (FPV) em relação ao cenário *no photovoltaic panels* (NPV).

O Cenário BIPV é o cenário com uma maior implementação de painéis fotovoltaicos no *canyon* urbano, em que são conjugados os cenários RPV e FPV. Os resultados obtidos para a temperatura das fachadas neste cenário estão representados na Figura 26.

A diferença de temperatura das fachadas entre o cenário FPV e BIPV é quase nula, sendo visível um aumento pouco significativo da temperatura no cenário BIPV, à exceção da fachada Norte, em que se nota um maior aumento. Como se observou anteriormente, no Cenário RPV a implementação de painéis apenas no telhado resultou num aumento contínuo da temperatura quase insignificante nas fachadas, ao passo que no cenário FPV ocorre um decréscimo de temperatura aquando os picos de temperatura do cenário NPV e um aumento da temperatura nas restantes horas. Considerando isto, era expectável que o cenário BIPV resultasse num perfil de temperatura das fachadas semelhante ao cenário FPV, mas com um aumento substancial, devido ao efeito dos painéis presentes no telhado.

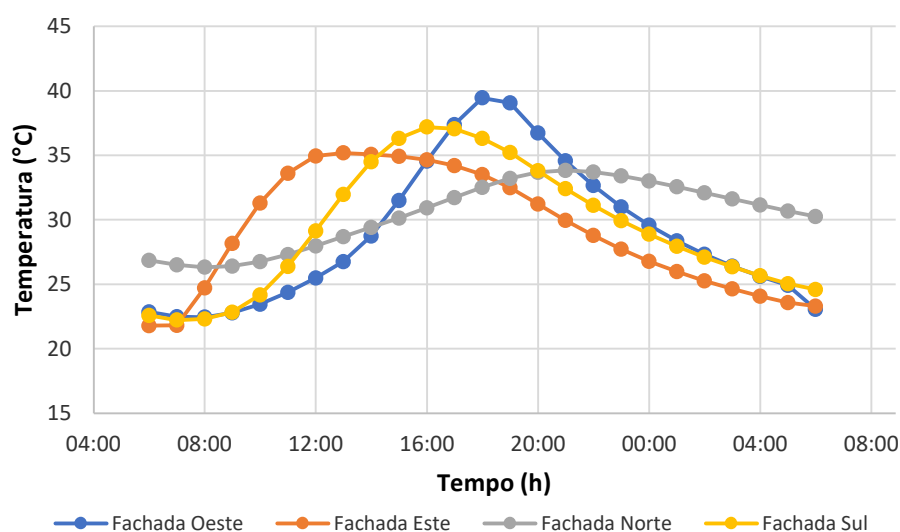


Figura 26- Perfil de temperatura das fachadas no cenário com PV nas fachadas e nos telhados (BIPV).

Como tal, todas as comparações entre os cenários NPV e BIPV são semelhantes às comparações anteriores entre os cenários FPV e NPV. Sendo assim, procede-se a uma análise entre os cenários BIPV, RPV e FPV.

Entre todas as fachadas, é visível um aumento superior na temperatura da fachada Norte em relação às restantes, em comparação com os outros cenários. Este aumento deve-se também à inexistência de radiação solar direta incidente sobre esta fachada, o que faz com que seja mais influenciada pelo efeito dos painéis no telhado, quando comparada com as restantes fachadas. No cenário RPV, a fachada Norte é a segunda com um maior aumento, no entanto, uma vez que a fachada Sul, que é a que sofre um maior aumento no RPV, recebe radiação solar direta durante grande parte do período diurno, o efeito dos painéis no telhado é menos relevante em relação à fachada Norte.

A variação de temperatura das fachadas em relação ao Cenário NPV obteve-se da mesma forma referida anteriormente, e encontra-se representada na Figura 27. Como se pode observar, esta é semelhante à Figura 25, evidenciando-se o desfasamento da variação de temperatura, com um atraso de aproximadamente uma hora em relação ao NPV, devido ao efeito da implementação do PV nas fachadas Norte.

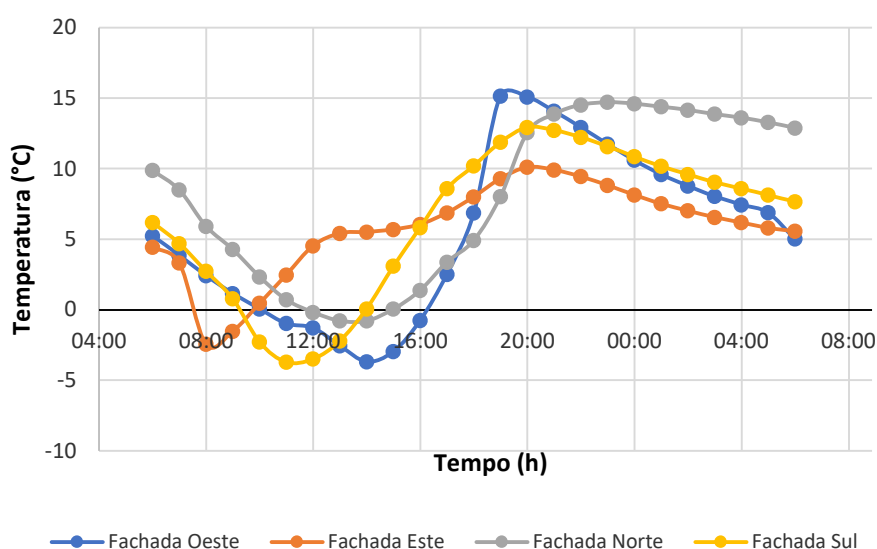


Figura 27-Variação de temperatura das fachadas no cenário com PV nos telhados e nas fachadas (BIPV) em relação ao cenário *no photovoltaic panels* (NPV).

4.2. Temperatura Ambiente

O impacto que a implementação de painéis fotovoltaicos pode vir a ter na temperatura ambiente do *canyon* urbano, constitui o principal objetivo deste estudo. Para tal, e como já foi referido na secção 3.5.2.3, foram definidos seis recetores na planta em estudo, de forma a obter a temperatura ambiente em vários pontos.

Desta forma, tal como na secção 4.1.1, foi analisada a diferença de temperatura ambiente entre o Cenário NPV e os cenários RPV, FPV e BIPV.

Observando a variação da temperatura ambiente entre o Cenário NPV e RPV, representada na Figura 28, é perceptível uma variação pouco significativa. Os recetores 3, 4 e 5, que são os três recetores localizados no *canyon* urbano, como foi indicado anteriormente, apresentam uma variação de temperatura quase nula com a implementação de painéis no telhado. Isto fundamenta a hipótese de que

a implementação de painéis no telhado não influencia o microclima térmico do *canyon* urbano. Contrariamente a estes, os recetores 1 e 2, que estão localizados na periferia do *canyon* urbano, apresentam um maior aumento de temperatura, embora também pouco significativo. Este aumento pode dever-se ao facto do recetor 1 e 2 serem os recetores mais influenciados pela fachada Sul, que devido à sua orientação, é a que sofre uma maior influência com a integração de painéis no telhado, como foi visto na Figura 22. No entanto, o recetor 6 também se encontra na periferia do *canyon* urbano, mas neste caso, devido à sua localização, este é mais influenciado pela fachada Norte. O perfil deste é semelhante ao dos recetores 3,4 e 5, o que também demonstra que a implementação de painéis no telhado não influencia a temperatura ambiente na periferia do *canyon*.

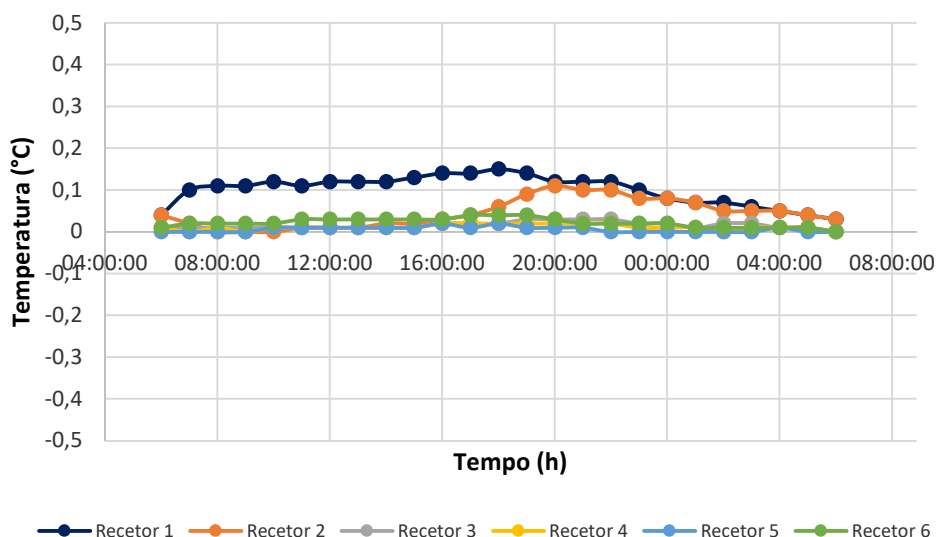


Figura 28 - Variação da temperatura ambiente entre o cenário *no photovoltaic panels* (NPV) e *roof with photovoltaic panels* (RPV).

O cenário FPV apresenta uma redução na temperatura ambiente durante o período diurno e um aumento durante o período noturno, como é representado na Figura 29. Entre todos os recetores, apenas o recetor 1 e 2 desviam-se do perfil de temperatura dos restantes, pelos motivos que já foram referidos anteriormente. Os restantes recetores apresentam uma redução de temperatura entre as 6h e as 19h, aproximadamente, no entanto são valores pouco relevantes, atingindo uma diminuição máxima de -0,11°C em relação ao cenário NPV. Entre as 19h e as 05h do dia seguinte, a temperatura aumenta, embora não ultrapasse os 0,1°C, à exceção dos valores registados no recetor 2, devido à sua localização, que é bastante influenciada pelas fachadas a Sul, e posteriormente pela radiação solar direta, visto que não tem obstáculos a Oeste.

Esta maior variação durante o período diurno era exetável, visto que as fachadas com PV absorvem uma maior quantidade de radiação solar, convertendo-a em eletricidade e, consequentemente, emitem menos calor do que a fachada sem PV, reduzindo assim a quantidade de energia na área estudada, levando a uma redução da temperatura ambiente

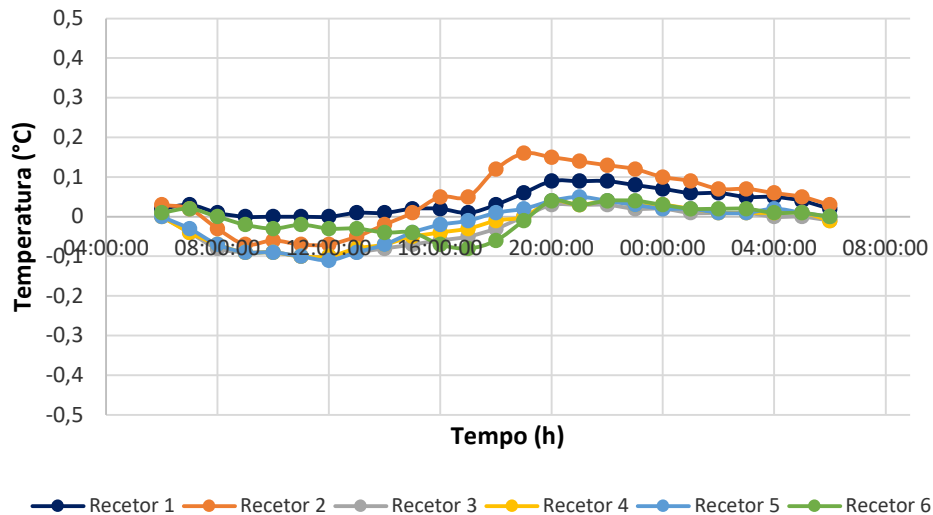


Figura 29 - Variação da temperatura ambiente entre o cenário *no photovoltaic panels* (NPV) e *facade photovoltaic panels* (FPV).

Tendo simulado e analisado os dois casos anteriores, resta analisar o cenário com a maior penetração de PV. Ao observar a Figura 30, é possível verificar que no cenário BIPV regista-se o esperado: a temperatura diminui durante o período diurno e aumenta durante o período noturno na maioria dos recetores (como no cenário FPV), no entanto não regista valores tão baixos, devido ao impacto dos painéis nos telhados.

Neste cenário, a temperatura medida nos recetores diminui até um valor máximo de $-0,09^{\circ}\text{C}$, sendo este valor medido nos recetores localizados no *canyon* (3, 4 e 5). É notável o impacto dos painéis no telhado maioritariamente nos recetores 1 e 2, que registam em todos os cenários um aumento de temperatura. Neste cenário, apresentam um máximo registado de $+0,20^{\circ}\text{C}$ no recetor 1 e $+0,25^{\circ}\text{C}$ no recetor 2 quando comparado com o cenário NPV, sendo estes os valores máximos de aumento de temperatura entre todos os cenários simulados. Uma vez que tanto o cenário RPV, como o FPV, revelavam um aumento de temperatura a partir das 18h nestes recetores, era esperado que neste cenário também se registasse um aumento de temperatura, superior aos dois anteriores.

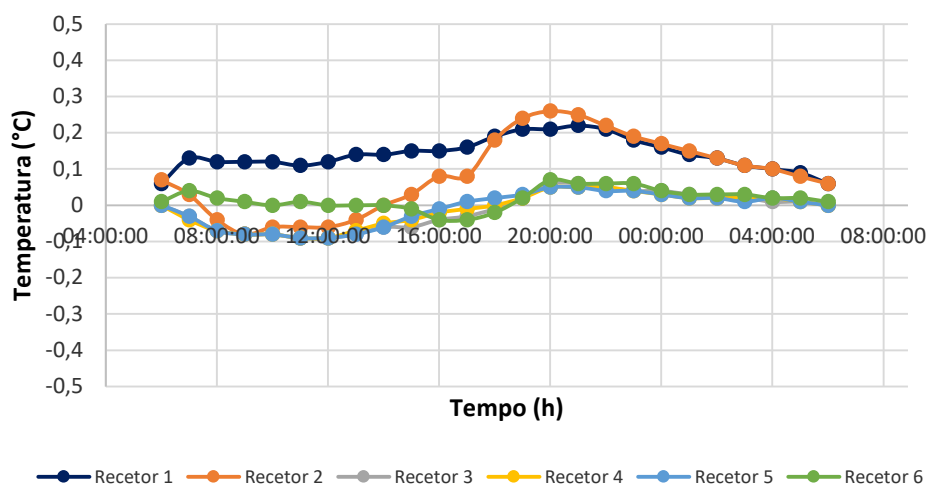


Figura 30- Variação da temperatura ambiente entre o cenário *no photovoltaic panels* (NPV) e PV nos telhados e nas fachadas (BIPV).

5. Conclusões

O crescimento do número de edifícios com BIPV tem sido visível nos últimos anos, e é espetável que este crescimento continue no futuro, tanto devido à descentralização da produção de energia, como à constante diminuição do custo dos painéis fotovoltaicos.

Para além dos fatores económicos, os fatores ambientais também poderão contribuir para o aumento do BIPV nas cidades, tendo em conta os resultados do presente estudo. Para além da penetração de PV não afetar negativamente o microclima das cidades, é previsto que uma maior penetração leve a uma redução, ainda que pequena, da temperatura ambiente do microclima urbano durante o período diurno, e consequentemente reduza o efeito de Ilha Urbana de Calor.

Analisando o impacto do BIPV na temperatura das fachadas, verifica-se um impacto insignificativo proveniente da integração de PV nos telhados, durante todo o dia. Nos cenários FPV e BIPV regista-se um desfazamento do perfil de temperatura das fachadas, resultando numa diminuição da temperatura dos edifícios aquando a incidência de radiação solar sobre as mesmas, e num aumento da temperatura tardio, após a transferência de calor dos painéis para a camada de ar e seguidamente para as paredes. Estes valores indicam que a integração de PV nas fachadas pode contribuir positivamente para a temperatura dos edifícios, uma vez que pode diminuir a temperatura dos mesmos durante os períodos de maior radiação, e aumentar a temperatura no fim do dia e no período noturno, agravando assim o efeito da IUC durante a noite.

Quanto ao impacto do BIPV na temperatura ambiente, conclui-se que nenhum dos cenários resulta numa variação significativa da temperatura no *canyon* urbano, uma vez que entre todos os cenários, registou-se um valor máximo de aumento de $0,05^{\circ}\text{C}$ e uma diminuição máxima de $0,1^{\circ}\text{C}$. Na periferia do *canyon* urbano, os resultados são igualmente insignificativos, registando-se um aumento máximo de $0,23^{\circ}\text{C}$, e uma diminuição de $0,08^{\circ}\text{C}$. Conclui-se também que a implementação de PV nas fachadas e nos telhados resulta numa diminuição de temperatura durante o período diurno, e num aumento de temperatura no período noturno.

No cenário RPV não se registou nenhuma diminuição de temperatura durante todo o período de simulação, ao contrário dos restantes cenários, devido ao aumento de temperatura no topo dos edifícios resultante dos painéis, que atingem maiores temperaturas do que o telhado normal, e desta forma condiciona a convecção natural no *canyon* urbano, o que impede a diminuição da temperatura ambiente. Uma vez que no cenário FPV não existe PV nos telhados, verificou-se uma diminuição de temperatura no *canyon* urbano durante o período diurno, uma vez que os painéis retiram energia do sistema edifício–ambiente, convertendo-a em eletricidade. Ainda, esta diminuição está também associada ao aumento de temperatura dos painéis durante o dia, que acumulam e emitem calor para os edifícios, o que leva a uma diminuição pouco significativa da temperatura ambiente, e a um aumento durante a noite devido à transferência de calor dos edifícios para os painéis, e consequentemente à dissipação de calor dos painéis para o ambiente.

Visto que no cenário BIPV se agregam os dois cenários anteriores, mas que a quantidade de PV instalado nas fachadas é bastante superior ao instalado nos telhados, registou-se um perfil de temperatura semelhante ao do cenário FPV, mas com um ligeiro aumento dos valores, devido ao efeito já referido dos painéis nos telhados.

Durante a noite, a temperatura aumenta em todos os cenários, devido à libertação de calor do material mais quente (PV) para a vizinhança (tanto para a fachada como para o *canyon* urbano). Por estes mesmos motivos, o Cenário RPV, com PV apenas nos telhados, apresenta alterações inferiores tanto na temperatura das fachadas, como na temperatura ambiente.

Com este estudo, é possível concluir que um aumento do BIPV nas cidades não interfere com o microclima urbano de forma significativa, uma vez que uma diminuição de 0.1°C na temperatura ambiente não é considerado por si só relevante para o sistema. No entanto, conclui-se também que não pode ser considerada uma medida de mitigação da IUC.

No entanto, para conclusões mais definitivas e consolidadas, seria importante um desenvolvimento de trabalho de campo, de forma a obter medições de temperatura locais mais definidas e com várias variáveis tidas em conta (p.e. vento e sombreamentos).

Para estudos futuros, seria interessante considerar a evolução dos rendimentos do PV, e qual o impacto destes nos resultados obtidos. Seria também interessante prever, através do ENVI-met, ou de uma conjugação do ENVI-met com outro programa de energia (EnergyPlus, por exemplo), o impacto do BIPV na temperatura no interior dos edifícios, de forma a compreender também o impacto de cada um dos cenários neste ponto.

Ainda, será também importante avaliar o impacto de vários *canyons* urbanos no microclima das cidades, uma vez que neste estudo foi considerada uma escala mais pequena, com apenas um *canyon*.

6. Bibliografia

Andreas K. Athienitis et al. 2018. *The impact of shading design and control on building cooling and lighting demand*. Solar Energy, ISSN: 0038-092X, Vol: 81, Issue: 3, Page: 369-382.

Alcoforado, M. J., Andrade, H., Oliveira, S., Festas, M. J., & Rosa, F. (2009). *Alterações climáticas e desenvolvimento urbano*. Direcção-Geral do Ordenamento do Território e Desenvolvimento Urbano Campo. Lisboa.

Alcoforado MJ, Lopes A, Alves EDL, Canário P (2014) *Lisbon heat island. Statistical study (2004-2012)*. Finisterra-Revista Portuguesa de Geografia, XLIX (98):61-80.

C. O'Malley, P. Piroozfar, E.R.P. Farr, F. Pomponi *Urban Heat Island (UHI) mitigating strategies: a case-based comparative analysis*. Sustain. Cities Soc., 19 (2015), pp. 222-235.

C.P. Skelhorn, G. Levermore, S.J. Lindley. *Impacts on cooling energy consumption due to the UHI and vegetation changes in Manchester, UK*. Energy Build., 122 (2016), pp. 150-159

D. O. Lee. 1984. *Urban climates*. Progress in Physical Geography, vol. 8, no. 1, pp. 1-31.

EIA, U.S. Energy Information Administration (2019). *International Energy Outlook 2019 with projections to 2050*. Washington.

ENVI-met Model Architecture. Disponível em:

<http://www.envimet.info/doku.php?id=intro:modelconcept>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2020.

European Commission - JRC Science for Policy Report (2017). *PV Status Report 2017*. Jäger-Waldau, A. Italy. pp 9-10.

European Union. 2016 *European regulatory framework for BIPV*. Horizon 2020 project, PV Sites.

G. Evola, A. Gagliano, A. Fichera, L. Marletta, F. Martinico, F. Nocera, A. Pagano. *UHI effects and strategies to improve outdoor thermal comfort in dense and old neighbourhoods*. Energy Procedia, 134 (2017), pp. 692-701.

G.L. Mellor and T. Yamada. *A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers*. Journal for Atmospheric Science, 31:1791-1806, 1974.

G.L. Mellor and T. Yamada. *Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems*. Rev. Geophys., 20:851-875, 1982.

G. Paltridge and C. Platt. *Radiative processes in Meteorology and Climatology*. Elsevier, New York, 1976. ISBN 0444414444.

J. T. Peterson. 1969. *The climate of cities: a survey of recent literature*. U.S. Department of Health, Education, and Welfare. n°AP-59.

Launder and D.B. Spalding. *The numerical computation of turbulent flow*. Computer Methods in Appl. Mechanics and Engineering, 3:269-289, 1974.

LNEC. 2006. *Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios*. Lisboa. ICT Informação Técnica, Edifícios – ITE 50.

Lopes, A. (2003). *Modificações no Clima de Lisboa Como Consequência do Crescimento Urbano. Vento, Ilha de Calor de Superfície e Balanço Energético*. Dissertação de Doutoramento. Universidade de Lisboa, Lisboa.

Lopes, A. (2006). *O sobreaquecimento das cidades. Causas e medidas para a mitigação da ilha de calor de Lisboa*. Lisboa. Territorium, (15), 39–52.

Lopes A, Alves E, Alcoforado MJ, Machete R (2013) *Lisbon Urban Heat Island Updated: New Highlights about the Relationships between Thermal Patterns and Wind Regimes*. *Advances in Meteorology*, vol. 2013, Article ID 487695, 11 pages, 2013.

Lopes A, Saraiva J, Alcoforado MJ (2011). *Urban boundary layer wind speed reduction in summer due to urban growth and environmental consequences in Lisbon*. *Environmental Modelling & Software*, 26(2): 241-243.

M. Bruse and H. Fleer. *Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model*. *Environmental Modelling & Software*, 13:373–384, 1998.

Martin Ordenes et al. 2006. *The impact of building-integrated photovoltaics on the energy demand of multi-family dwellings in Brazil*. *Brazil. Energy and Buildings*, ISSN: 0378-7788, Vol: 39, Issue: 6, Page: 629-642.

Matias,M (2018). *O balanço radiativo de um conjunto de edifícios em telheiras com recurso a termografia infravermelha*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geografia e Ordenamento de Território. Universidade de Lisboa, Lisboa.

Mellor and T. Yamada. *A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers*. *Journal for Atmospheric Science*, 31:1791–1806, 1974.

Mellor and T. Yamada. *Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems*. *Rev. Geophys.*, 20:851–875, 1982.

Oke, T. R., 1988. *Boundary Layer Climates*. Londres. Taylor & Francis Ltd.

Oke, T., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. (2017). *Urban Climates*. Cambridge: Cambridge University Press.

Sebastian Huttner. 2012. *Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-met*. Dissertação de Doutoramento. Departamento de Química, Farmácia e Ciências da Terra da Universidade Johannes Gutenberg, Mainz, Alemanha.

United Nations, Department of Economic and Social Affairs (2019). *World Population Prospects- The 2019 Revision*. New York. pp 1-2.

United Nations, Department of Economic and Social Affairs (2018). *World Urbanization Prospects The 2018 Revision*. New York. pp 2-6.

Voogt, J.a, & T.r Oke (2003). *Thermal Remote Sensing of Urban Climates*. *Remote Sensing of Environment*, vol. 86, no. 3, pp. 370–384

Wei Tiang et al. 2007. *Effect of building integrated photovoltaics on microclimate of urban canopy layer*. *Building and Environment*, ISSN: 0360-1323, Vol: 42, Issue: 5, Page: 1891-1901.

Yamamoto, Y., 2006. Measures to mitigate urban heat islands. *Sci. Tech. Trends Q. Rev.* 18 (1), 65 – 83.

Yamamoto, Y., 2006. *Measures to mitigate urban heat islands*. *SCI. Tech. Trends Quarterly Review* No.18 65-67.

Yiping Wang, et al. (2005). *Influence of a building's integrated photovoltaics on heating and cooling loads*. *China. Applied Energy*, ISSN: 0306-2619, Vol: 83, Issue: 9, Page: 989-1003.

Yutaka et al. 2003. *Impacts of Large-Scale photovoltaic panel installation on the heat Island Effect in Tokyo*. Tóquio, Japão.

Zhubir, Nur et al. (2017). *Thermal and electrical study for PV panel with cooling system*. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. 7. 492-499. 10.11591/ijeecs.v7.i2.pp492-499.

7. Anexos

Anexo 1- Dados iniciais da temperatura e humidade relativa.

Tabela 4- Dados da temperatura e humidade relativa referentes ao primeiro dia a simular.

Hora	Temperatura (°C)	Humidade Relativa (%)
00:00	19,08	81,5
01:00	19,1	82,8
02:00	18,96	83
03:00	18,96	83,7
04:00	18,79	84,1
05:00	18,84	84,3
06:00	18,89	85,6
07:00	19,84	82,6
08:00	20,1	81,7
09:00	21,01	77,7
10:00	21,91	72,3
11:00	24,22	65,2
12:00	24,36	60,4
13:00	25,21	56,5
14:00	26,62	54,2
15:00	26,67	53,9
16:00	26,43	55,6
17:00	25,45	58
18:00	23,8	60,4
19:00	22,23	63,2
20:00	20,86	67,2
21:00	19,65	76,1
22:00	19,15	79,8
23:00	19,01	82,3

Anexo 2- Plantas definidas para os diferentes Cenários.

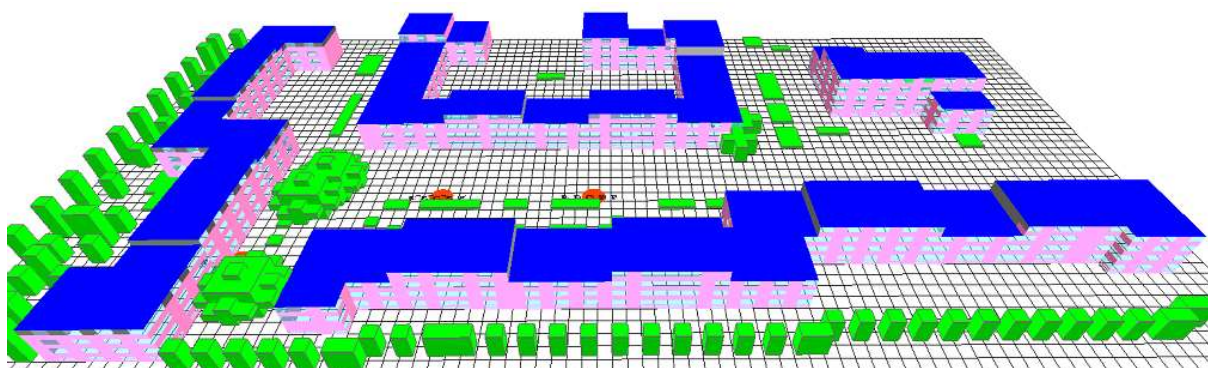


Figura 32 - Planta referente ao Cenário RPV (Implementação de PV apenas nos telhados).

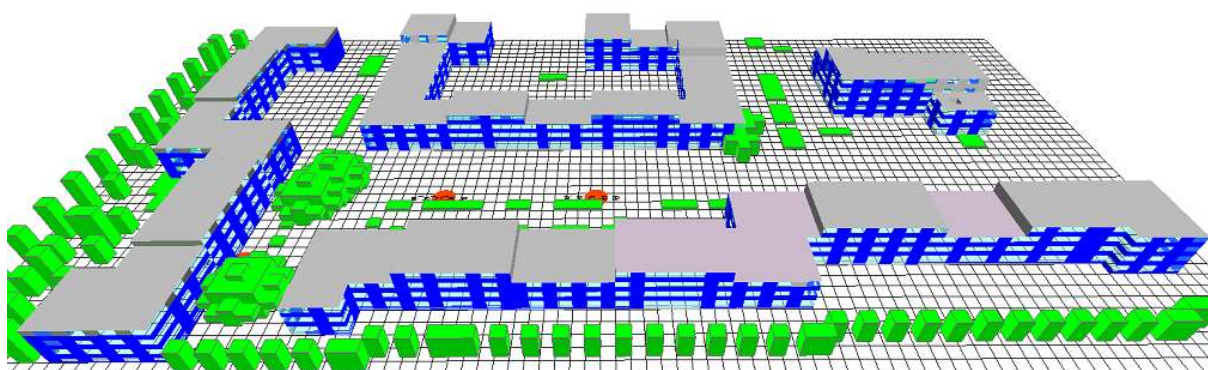


Figura 332 - Planta referente ao Cenário FPV (Implementação de PV apenas nas fachadas).

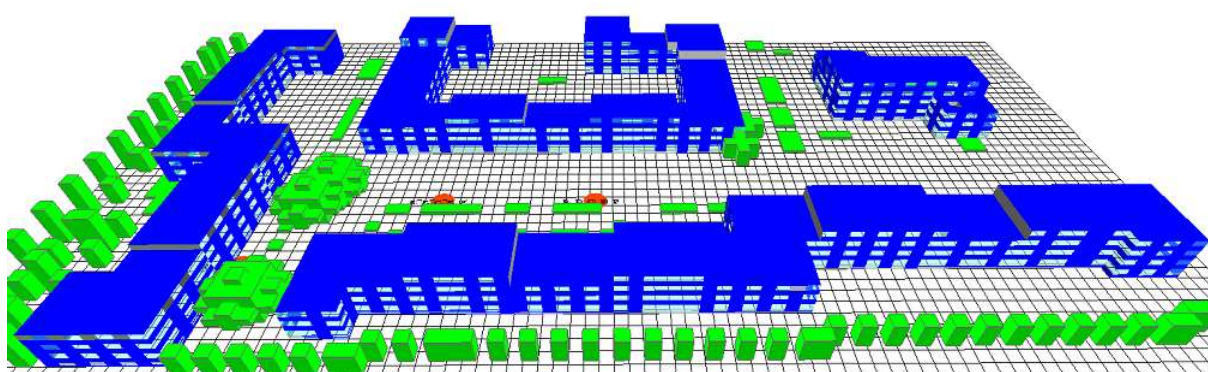


Figura 313 - Planta referente ao Cenário BIPV (Implementação de PV nos telhados e nas fachadas).

Anexo 3- Imagens térmicas dos resultados das simulações realizadas.

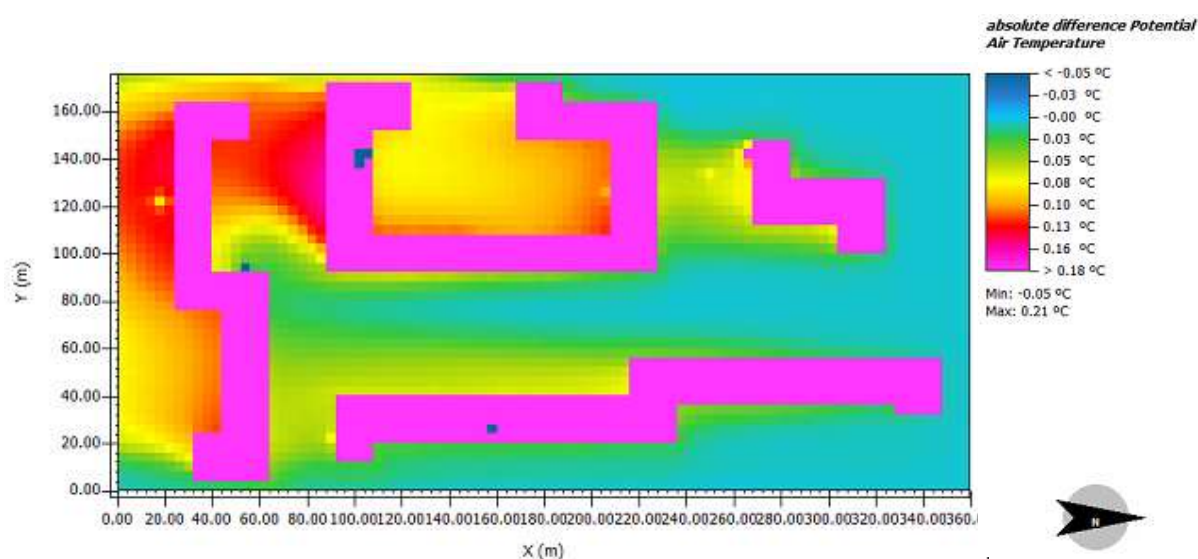


Figura 344- Aumento máximo da temperatura das fachadas no cenário RPV em relação ao cenário NPV (18:00h).

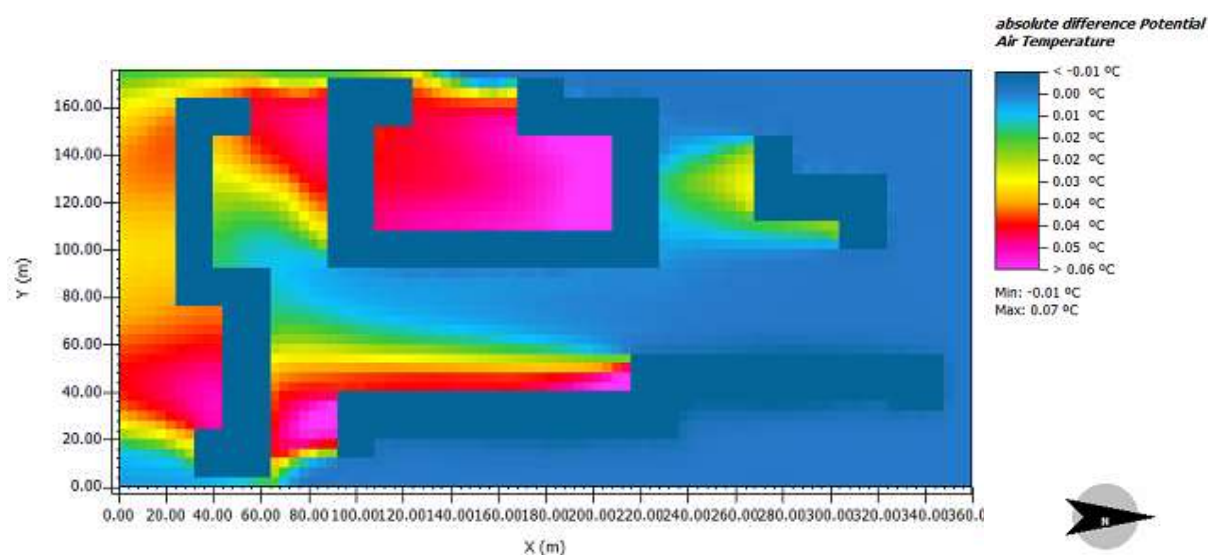


Figura 355- Diminuição máxima da temperatura no cenário RPV em relação ao cenário NPV (06:00h).

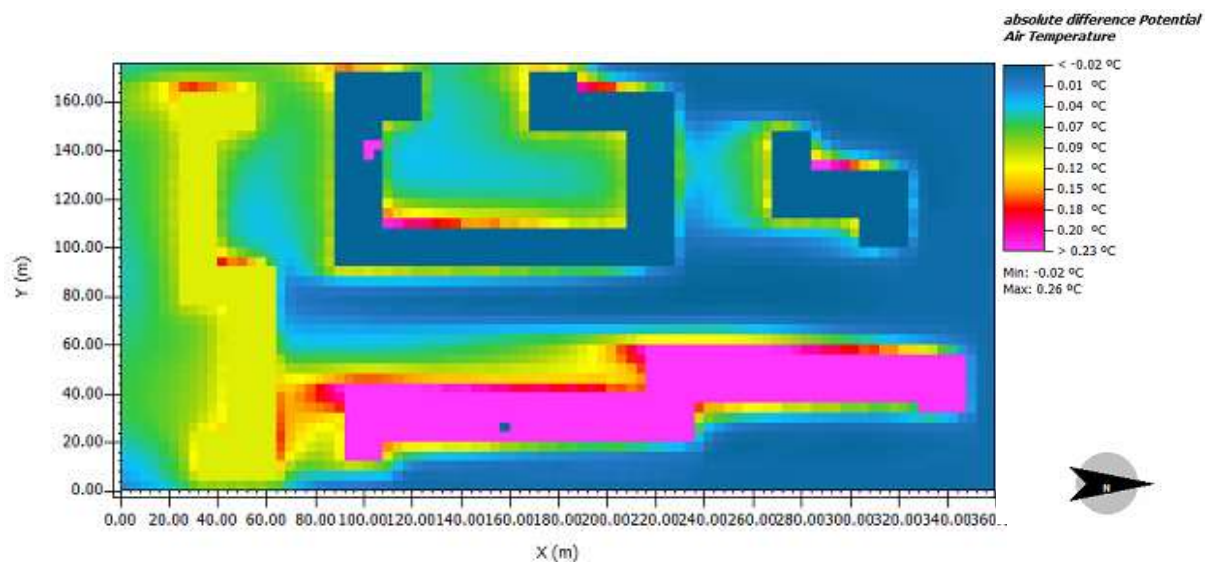


Figura 376- Aumento máximo da temperatura das fachadas no cenário FPV em relação ao cenário NPV (20:00h).

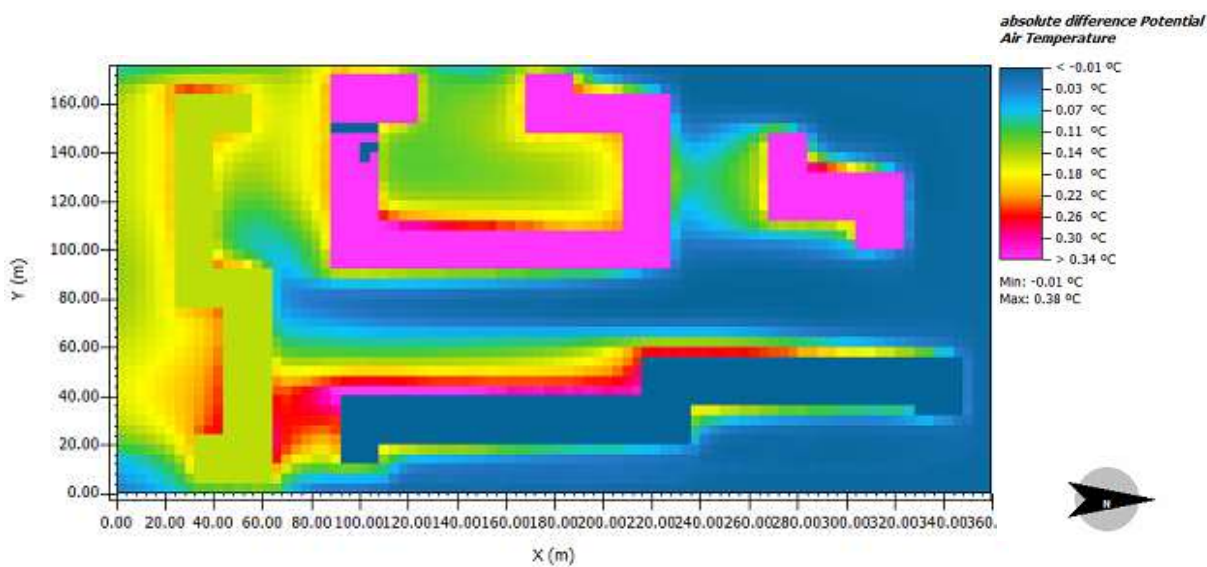


Figura 367- Diminuição máxima da temperatura das fachadas no cenário FPV em relação ao cenário NPV (12:00h).

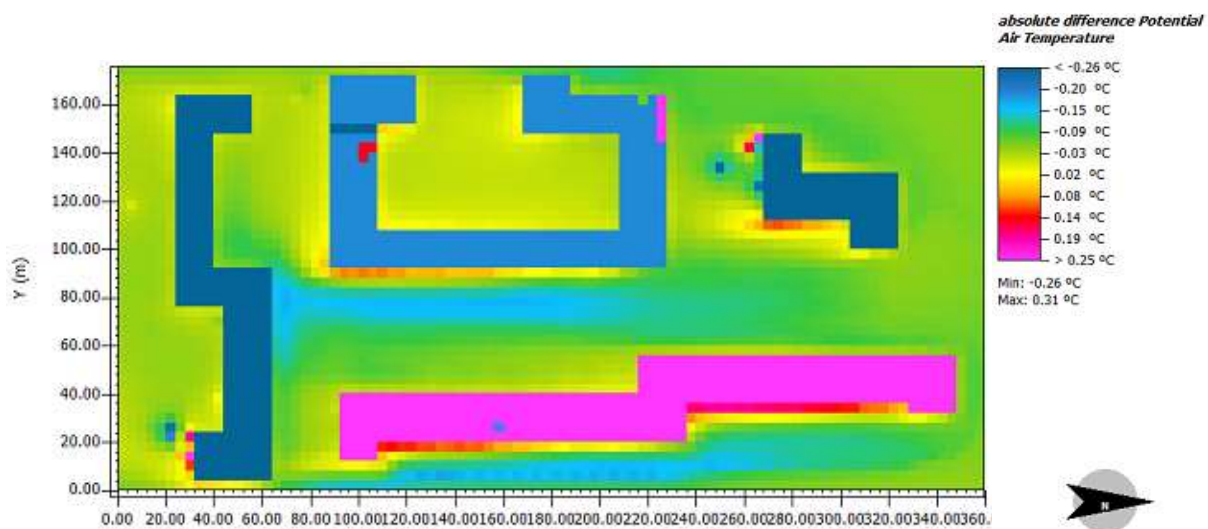


Figura 388-Aumento máximo da temperatura das fachadas no cenário BIPV em relação ao cenário NPV (20:00h).

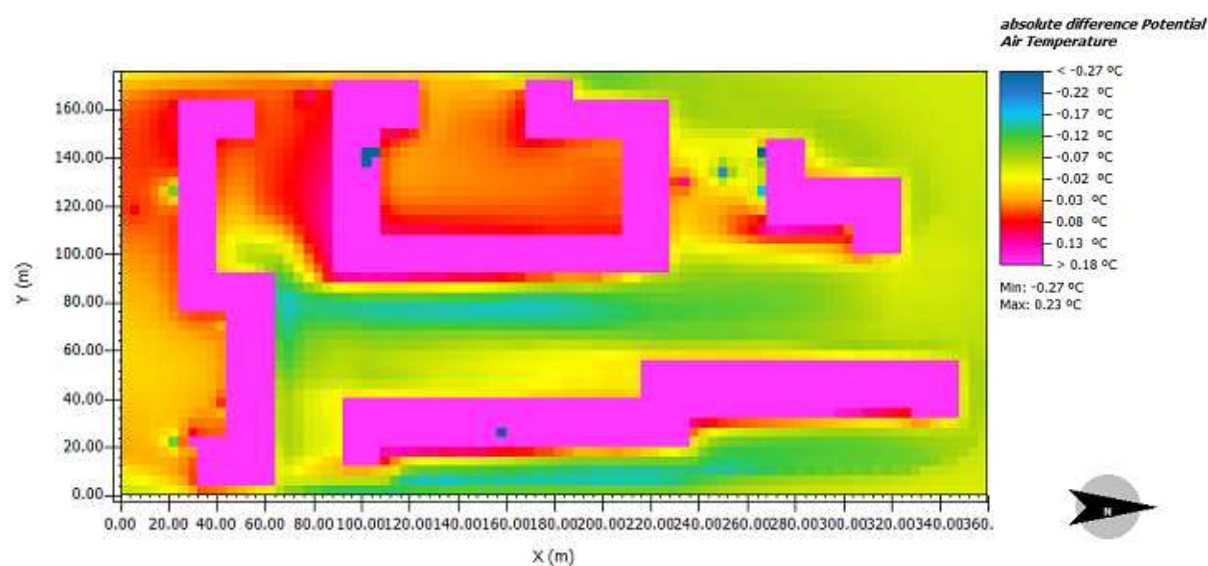


Figura 399- Diminuição máxima da temperatura das fachadas no cenário BIPV em relação ao cenário NPV (12:00h).